

**TUGAS AKHIR - TM 141585**

# **STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS - SAVONIUS DENGAN PENAMBAHAN *STAGE* ROTOR DARRIEUS**

**DANANTA PUTRA TEJA**  
**NRP 2112 100 056**

**Dosen Pembimbing**  
**Vivien Suphandani S.T.,M.E., Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS -  
SAVONIUS DENGAN PENAMBAHAN *STAGE*  
ROTOR DARRIEUS**

**DANANTA PUTRA TEJA**  
**NRP 2112 100 056**

**Dosen Pembimbing**  
**Vivien Suphandani S.T.,M.E., Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - TM 141585

***NUMERICAL STUDY OF DARRIEUS - SAVONIUS  
WIND TURBINE WITH ADDITION ROTOR  
DARRIEUS ROTOR STAGE***

DANANTA PUTRA TEJA  
NRP 2112 100 056

Adviser  
Vivien Suphandani S.T.,M.E., Ph.D.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty Of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute Of Technology  
Surabaya 2017

# **STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS – SAVONIUS DENGAN PENAMBAHAN STAGE ROTOR DARRIEUS**

## **TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh :**

**DANANTA PUTRA TEJA**

**NRP. 2112 100 056**

**Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :**

1. Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D. (Pembimbing)  
NIP. 198105292003122001
2. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. (Penguji I)  
NIP. 197104051997021001
3. Prof Ir Sutardi, M.Eng, Ph.D (Penguji II)  
NIP. 196412281990081002
4. Bambang Arip Dwiyantoro, S.T., Ph.D (Penguji III)  
NIP. 197804012002121001

**SURABAYA**

**JANUARI, 2017**

**LEMBAR PENGESAHAN**

## **STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS – SAVONIUS DENGAN PENAMBAHAN *STAGE* ROTOR DARRIEUS**

Nama Mahasiswa : Dananta Putra Teja  
NRP : 2112 100 056  
Jurusan : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

### **Abstrak**

Sebagai salah satu pengekstrak energi yang terbaharukan, turbin angin memiliki peranan penting dalam mengatasi permasalahan ketersediaan energi yang semakin dibutuhkan. Turbin angin dengan posisi sumbu poros tegak lurus (Vertical Axis Wind Turbine / VAWT), belakangan menjadi sorotan banyak peneliti karena jenisnya yang mampu banyak dimodifikasi untuk mengoptimalkan ekstraksi. Turbin angin Darrieus – Savonius, merupakan modifikasi dari 2 jenis turbin angin yaitu turbin angin dengan rotor Savonius, dan turbin angin dengan rotor Darrieus. Modifikasi ini, bertujuan untuk meningkatkan kemampuan rotor Darrieus menghasilkan torsi pada putaran rendah. Salah satu bentuk modifikasi yang menarik untuk dilakukan adalah penambahan jumlah *stage* pada Darrieus. Pasalnya, penelitian telah banyak membuktikan, bahwa penambahan *stage* pada rotor Savonius dapat meningkatkan performa rotor menjadi lebih kontinyu dalam mengekstraksi energi. Dalam penelitian ini, penulis bertujuan untuk menganalisa performa dari turbin angin Darrieus – Savonius bilamana terdapat penambahan *stage* pada rotor Darrieus.

Dalam penelitian ini, dilakukanlah studi numerik tentang pengaruh penambahan jumlah *stage* dengan rotor Darrieus jenis *straight bladed* pada instalasi turbin angin *hybrid* Darrieus – Savonius. Tujuannya, untuk mengetahui apakah konfigurasi penambahan ini dapat meningkatkan performa daripada turbin. Untuk membantu studi numerik ini dibantu menggunakan

perangkat lunak (*software*) STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah jumlah *stage* pada rotor Darrieus. Model penelitian yang dipakai adalah turbin angin Darrieus - Savonius dengan tipe rotor Darrieus *straight bladed* bersudu airfoil simetris mengikuti profil NACA 0024. Sementara itu rotor Savonius berada diantara rotor Darrieus merupakan rotor Savonius dengan *dual stage* yang memiliki jumlah sudu sebanyak 2. Sementara itu, kecepatan angin divariasikan pada kecepatan 5, 10 dan 15 m/s.

Setelah penelitian numerik dilakukan, maka dapat dilihat bahwa torsi dan koefisien daya mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan *tip speed ratio*. Torsi yang dihasilkan akan meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin. Torsi maksimum yang mampu dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius terjadi pada kecepatan 15 m/s dan. Koefisien daya maksimum yang dihasilkan oleh Turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* terjadi pada kecepatan 15 m/s.

***Kata Kunci : Stage, Turbin Angin, Darrieus-Savonius, Koefisien Daya.***

**NUMERICAL STUDY OF DARRIEUS – SAVONIUS WIND  
TURBINE WITH ADDITION OF DARRIEUS DARRIEUS  
ROTOR STAGE**

Student Name : Dananta Putra Teja  
NRP : 2112 100 056  
Department : Mechanical Engineering  
Supervisor : Vivien Suphandani S.T.,M.E.,Ph.D

**Abstract**

*As one of the green energy extractor, wind turbine has a potential role to solve the problem in energy demand. Vertical axis wind turbine, has gotten many researchers attention because there are so many type of this turbine and has so many ways to modify and optimize the energy extraction. Darrieus – Savonius wind turbine is a modified version from two types of turbine. therefore it has two types of rotor which is Darrieus rotor and Savonius rotor. this modification aims to increase the performance of Darrieus rotor to produce torque in low angular velocity. The other modification which is interesting to be done is an addition of Darrieus stage. Researchers have proven that Savonius rotor performance can be increased due to addition of stages in Savonius. Therefore, in this researcher writer aims to analyze the performance of Darrieus – Savonius wind turbine when the stage in rotor Darrieus is added.*

*In this research, numerical study about adding stages in a hybrid wind turbine installation is done to review whether this configuration will increase the overall performance of the turbine. Numerical solving is done through software STAR-CCM+ 9.02.007-R8. This research uses number of stage as the variation in Darrieus rotor. The geometry used in this research is Darrieus – Savonius wind turbine with straight-bladed Darrieus with symmetrical airfoil following the NACA 0024 profile. The Savonius rotor coupled in the turbine is a dual stage rotor with 2 buckets each stage. Wind is varied in 5,10, and 15 m/s.*

*after the numerical solving is done. then it can be concluded that the torque and the power coefficient has been increasing with the increased number of tip speed ratio. Maximum torque which can produced by the Darrieus – Savonius wind turbine is found in the wind speed of 15 m/s and also the power coefficient is this point.*

***Key Words : Stage, Wind turbine, Darrieus-Savonius, Power coefficient.***



## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis ucapkan karena telah berhasil mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul: **Studi Numerik Turbin Angin Darrieus – Savonius Dengan penambahan Stage Rotor Darrieus**. Penulis ingin berterima kasih kepada orang-orang di sekitar penulis yang ikut terlibat dalam penulisan tugas akhir ini. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu dan saudara - saudara penulis yang selalu memberikan doa dan kasih sayangnya. Terima kasih atas dukungan baik secara moral maupun materil yang tiada henti selama ini.
2. Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir ini. Terima kasih untuk waktu, kritik dan saran serta motivasinya hingga terselesaikan tugas akhir ini.
3. Dr Wawan Aries Widodo, S.T., M.T, Prof. Sutardi, M.Eng., Ph.D dan Bambang Arip Dwiyanoro, S.T., Ph.D selaku dosen pembahas yang telah memberikan sarannya demi kesempurnaan tugas akhir.
4. Melling Prasetya yang selalu memberikan semangat dan dukungannya secara moral bagi kelancaran pengerjaan tugas akhir.
5. Ilmawan, dan Surya, sobat seperjuangan tugas akhir, terima kasih sudah selalu setia mendukung dan membantu selama pengerjaan
6. Sahabat-sahabat Carkit: Yansen, Junior, dan Felix yang selalu memberi semangat dan doanya bagi kelancaran pengerjaan tugas akhir.
7. Sahabat-sahabat Klop: Ce shin, Fenny, Willy, James, Alan, Ko liman, ko wilik, dan nia yang memberikan canda tawa dalam pengerjaan hingga akhir
8. Republik Kentang Mekflu: Fahmi”copet”haq, Ulul, Wanda, Angga Eka, Asa, Ridho, dan yang lainnya terima kasih atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan.

9. Teman-teman M55 terima kasih telah menemani perjuangan selama perkuliahan. Tetep jadi angkatan yang sangar ya rek!

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan tugas akhir kedepannya. Akhir kata penulis berharap agar tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi semua.

Surabaya, 20 Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
Abstrak	v
Abstract	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.1.1. Dwiyantoro et. al. (2015)	5
2.1.1. Kumar et. al. (2014)	7
2.1.3. Gosselin et. al. (2016)	16
2.1.4. Kanyako et. al. (2014)	19
2.1.5. Ionescu et. al. (2014)	20
2.1.6. Biswas et. al. (2014)	22
2.2. Dasar Teori	29
2.2.1. Potensi Energi Angin	29
2.2.2. Turbin Angin Sumbu Vertikal	29
2.2.3. Turbin Savonius dan Turbin Darrieus	30
2.2.4. Turbin Darrieus – Savonius	36
2.2.5. Torsi dan Koefisien Daya	37
2.2.6. Tip Speed Ratio	38
2.2.7. <i>Solidity</i>	39

2.2.8.	Aspect Ratio	40
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		41
3.1.	Variasi dan Domain Simulas	41
3.1.1.	Variasi	41
3.1.2.	<i>Domain</i> Simulasi	42
3.2.	Tahap <i>Pre Processing</i>	42
3.2.1.	Pembuatan Geometri dan <i>Meshing</i>	42
3.2.2.	<i>Boundary Condition</i>	48
3.2.3.	Parameter Permodelan	49
3.3.	Tahap <i>Processing</i>	50
3.4.	Tahap <i>Post Processing</i>	50
3.5.1.	Perhitungan TSR	50
3.5.2.	Perhitungan <i>Solidity</i>	51
3.5.3.	Perhitungan Time step	51
3.5.4.	Perhitungan Koefisien daya	52
3.6.	Diagram Alir ( <i>Flowchart</i> )	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		55
4.1.	Putaran turbin dan <i>tip speed ratio</i>	55
4.2.	<i>Time Step</i>	55
4.3.	<i>Grid Independence</i>	56
4.4.	Penamaan – penamaan pada analisis	58
4.5.	Analisis Turbin Angin Darreus – Savonius dengan panjang <i>chord</i> sudu rotor Darrieus 1 cm	62
4.5.1.	Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage	62
4.5.1.	Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus <i>dual stage</i>	63
4.5.2.	Analisis Perbandingan Torsi dan koefisien daya	66
4.6.	Analisis Turbin Angin Darreus – Savonius dengan panjang <i>chord</i> sudu rotor Darrieus 2 cm	69

4.6.1.	Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus <i>single stage</i>	69
4.6.2.	Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus <i>dual stage</i>	70
4.6.3.	Analisis Perbandingan Torsi dan koefisien daya	72
4.7.	Analisis Perbandingan Panjang <i>chord</i> sudu Darrieus	73
BAB V PENUTUP		79
5.1.	Kesimpulan	79
5.2.	Rekomendasi	80
DAFTAR PUSTAKA		81
BIODATA PENULIS		83

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Desain VAWT Darrieus – Savonius Dwiyantoro et. al. (Dwiyantoro et. al. 2015).....	5
Gambar 2.2 2 tipe turbin <i>hybrid</i> yang pernah dilakukan uji eksperimen (Dwiyantoro et. al. 2015).....	6
Gambar 2.3 grafik hubungan koefisien daya turbin angin <i>hybrid</i> Darrieus – Savonius terhadap TSR (Dwiyantoro et.al. 2015).....	7
Gambar 2.4 konfigurasi kombinasi antara <i>Darrieus wings</i> dengan Savonius (Kumar et. al. 2014).....	8
Gambar 2.5 turbin air dengan rotor Darrieus-Savonius (Kumar et.al. 2014).....	9
Gambar 2.6 turbin angin ERIGEN yang diujikan pada tegangan tinggi (Kumar et. al. 2014).....	10
Gambar 2.7 konfigurasi turbin dengan variasi <i>bucket overlapping</i> (Kumar et. al. 2014) .....	11
Gambar 2.8 konfigurasi turbin dengan rotor <i>hybrid</i> Darrieus dan Savonius (Kumar et. al. 2014).....	12
Gambar 2.9 representasi model turbin Letcher T. (Kumar et. al. 2014).....	13
Gambar 2.10 Gambar <i>isosurface</i> dari turbin angin 3 D pada TSR $\lambda = 3.4$ dengan jumlah sudu 3 dan AR = 7. (Gosselin et. al. 2016)	17
Gambar 2.11 Gambar kontur tekanan yang ada disekitar permukaan sudu (a) tanpa end-plate (b) dengan end-plate NACA (c) dengan end-plate lingkaran (Gosselin et. al. 2016).....	17
Gambar 2. 12 Grafik koefisien daya terhadap torsi untuk masing – masing jenis profil sudu Darrieus (Kanyako et. al. 2014).....	20
Gambar 2. 13 Grafik koefisien daya terhadap TSR dengan variasi jumlah sudu (Kanyako et. al. 2014) .....	20
Gambar 2.14 grafik perbandingan antara koefisien daya yang dihasilkan oleh tiap <i>aspect ratio</i> yang berbeda terhadap TSR (Ionescu et. al. 2014).....	21
Gambar 2.15 model yang digunakan dalam analisa (a) D/H = 0.998, (b) D/H = 0.8, (c) D/H=0.571 (Ionescu et. al. 2014).....	22

Gambar 2.16 rotor yang akan diuji (a) H-rotor Darrieus (b) <i>hybrid</i> rotor Darrieus - Savonius (Biswas et. al. 2014).....	24
Gambar 2.17 profil NREL S818 sebagai sudu airfoil Darrieus (Biswas et. al. 2014).....	25
Gambar 2.18 skema eksperimen dari turbin Darrieus- Savonius (Biswas et. al. 2014).....	25
Gambar 2.19 grafik torsi hasilan rotor Darrieus terhadap sudut azimuth pada bilangan Reynolds yang berbeda (Biswas et. al. 2014).....	26
Gambar 2.20 grafik torsi hasilan rotor <i>hybrid</i> Darrieus - Savonius terhadap sudut azimuth pada bilangan Reynolds yang berbeda (Biswas et. al. 2014).....	26
Gambar 2.21 grafik perbandingan antara koefisien torsi terhadap TSR antara rotor dengan tipe H-rotor Darrieus sederhana dengan turbin <i>hybrid</i> dengan Savonius tidak <i>overlap</i> pada (a) $Re = 1.44 \times 10^5$ (b) $Re = 1.92 \times 10^5$ (c) $Re = 2.31 \times 10^5$ (Biswas et. al. 2014).....	27
Gambar 2.22 grafik perbandingan antara koefisien daya terhadap TSR antara rotor dengan tipe H-rotor Darrieus sederhana dengan turbin <i>hybrid</i> dengan Savonius tidak <i>overlap</i> pada (a) $Re = 1.44 \times 10^5$ (b) $Re = 1.92 \times 10^5$ (c) $Re = 2.31 \times 10^5$ (Biswas et. al. 2014).....	28
Gambar 2.23 macam-macam turbin angin bersumbu vertikal (a) Darrieus rotor , (b) Savonius rotor (Bhutta et. al. 2011) .....	30
Gambar 2.24 bentuk aliran yang melintasi suatu rotor Savonius (Akwa et. al. 2012).....	32
Gambar 2.25 segitiga kecepatan disekitar airfoil turbin ( <a href="http://windturbine-analysis.com">http://windturbine – analysis.com</a> ).....	35
Gambar 2.26 beberapa contoh turbin Darrieus (a) tipe pengocok telur ( <i>eggbeater</i> ) dan (b) tipe rotor H ( <i>giromill</i> ) (Bhutta et. al. 2011) .....	36
Gambar 2.27 Turbin Darrieus – Savonius (Kumar et. al. 2014) .	37
Gambar 2.28 Grafik koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> untuk berbagai macam turbin angin (Bashar et. al. 2014).....	40
 Gambar 3. 1 Dimensi rotor Savonius yang digunakan.....	 43



Gambar 3. 2 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage ( a ) gambar isometris ( b ) dimensi .....	44
Gambar 3. 3 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage ( a ) gambar isometris ( b ) dimensi .....	45
Gambar 3. 4 geometri hitung dari perhitungan turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus ( a ) Single Stage ( b ) Dual stage .....	46
Gambar 3. 5 surface mesh disekitar model turbin angin Darrieus - Savonius dari permodelan ( a ) single stage , ( b ) dual stage .....	47
Gambar 3. 6 meshing pada turbin model single stage pada plane perpotongan tengah, .....	48
Gambar 3.7 Boundary conditions yang dipakai pada perhitungan numerik ( a ) single stage, ( b ) dual stage.....	49
Gambar 3.8 Diagram alir penelitian secara umum .....	53
Gambar 3.9 diagram alir penelitian numerik.....	54

Gambar 4.1 Grafik torsi yang mampu direkam masing-masing jenis mesh pada putaran steady .....	57
Gambar 4. 2 mesh tipe B dengan jumlah cells sebesar 800000 ..	57
Gambar 4.3 Penamaan sudu darrieus untuk turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus Single Stage .....	58
Gambar 4.4 Penamaan sudu Darrieus untuk turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage .....	58
Gambar 4.5 Skema putaran sudut untuk instalasi analisis numerik turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage.....	59
Gambar 4. 6 Skema putaran sudut untuk instalasi analisis numerik turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage .....	59
Gambar 4. 7 Skema letak bidang planar analisis kontur untuk instalasi turbin angin single stage pada posisi $\Theta = 0^\circ$ .....	60
Gambar 4. 8 Skema letak bidang planar analisis kontur untuk instalasi turbin angin dual stage pada posisi $\Theta = 0$ derajat.....	61

Gambar 4.9 streamline aliran angin yang melewati turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage pada kecepatan 10m/s pada $\Theta = 0^0$ , $Re = 6.38 \times 10^6$ .....	62
Gambar 4.10 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage dengan panjang chord sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10 m/s, $Re = 6.38 \times 10^6$ .....	64
Gambar 4.11 Kontur tekanan yang dihasilkan turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage dengan anjang chord sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10m/s pada putaran sudut $\Theta = 180^0$ , $Re = 6.38 \times 10^6$ .....	64
Gambar 4.12 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage dengan panjang chord sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10 m/s.....	65
Gambar 4.13 Kontur tekanan pada turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage dengan panjang chord sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10 m/s pada posisi $\Theta = 180^0$ , $Re = 6.38 \times 10^6$ .....	65
Gambar 4.14 Grafik Torsi yang dihasilkan pada rotor Darrieus turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage dengan panjang chord Darrieus 1 cm pada kecepatan angin 10 m/s .....	67
Gambar 4.15 Streamline aliran melewati instalasi turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage dengan panjang chord sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan angin 10m/s	67
Gambar 4.16 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang chord sudu Darrieus 1 cm terhadap TSR, $Re = 3.19 \times 10^6$ , $6.28 \times 10^6$ , $9.57 \times 10^6$ .....	68
Gambar 4.17 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang chord sudu Darrieus 1 cm terhadap TSR, $Re = 3.19 \times 10^6$ , $6.28 \times 10^6$ , $9.57 \times 10^6$ .....	68
Gambar 4.18 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage dengan panjang chord sudu Darrieus 2 cm pada kecepatan 10 m/s, $Re = 1.28 \times 10^7$ .....	69

Gambar 4.19 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage dengan panjang chord sudu Darrieus 2 cm pada kecepatan 10 m/s, $Re = 1.28 \times 10^7$ .....	71
Gambar 4. 20 Grafik Torsi yang dihasilkan pada rotor Darrieus turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage dengan panjang chord Darrieus 2 cm pada kecepatan angin 10 m/s, $Re = 1.28 \times 10^7$ .....	71
Gambar 4.21 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang chord sudu Darrieus 2 cm terhadap TSR, $Re = 6.28 \times 10^6$ , $1.28 \times 10^7$ , $1.91 \times 10^7$ .....	72
Gambar 4.22 Grafik koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang chord sudu Darrieus 2 cm terhadap TSR, $Re = 6.28 \times 10^6$ , $1.28 \times 10^7$ , $1.91 \times 10^7$ .....	73
Gambar 4.23 Grafik tren torsi yang dihasilkan turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage pada kecepatan 10m/s .....	74
Gambar 4. 24 Kontur Tekanan untuk masing – masing instalasi turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage (a) dengan panjang chord 1cm, $Re = 6.38 \times 10^6$ (b) dengan panjang chord 2 cm, $Re = 1.28 \times 10^7$ pada kecepatan 10 m/s, $\Theta = 180^\circ$ ..	75
Gambar 4.25 Grafik Tren torsi rata –rata dari turbin angin Darrieus – Savonius terhadap TSR .....	76
Gambar 4. 26 Grafik tren Koefisien daya dari turbin Darrieus – Savonius terhadap TSR .....	77

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 perbandingan performa suatu turbin vertikal skala kecil (Kumar et. al. 2014) .....	14
Tabel 2.2 pengaruh <i>aspect ratio</i> terhadap hasil 2D (Gosselin et. al. 2016).....	16
Tabel 2.3 tabel perbandingan numerik performa dari turbin 3D dengan penambahan <i>end-plate</i> dengan hasil 2D (Gosselin et. al. 2016).....	18
Tabel 2.4 Tabel perbedaan antara turbin angin sumbu vertikal dan sumbu horizontal (Bhutta et. al. 2011) .....	31
 Tabel 3.1 Parameter penelitian.....	 41
 Tabel 4. 1 data kecepatan sudut turbin dan tip speed ratio untuk setiap kecepatan inlet.....	 55
Tabel 4.2 Time step untuk tiap kecepatan angin .....	56
Tabel 4.3 Hasil uji grid independency.....	56

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Turbin angin dengan posisi poros tegak lurus terhadap arah angin (*Vertical Axis Wind Turbine*) memiliki banyak sekali pilihan modifikasi untuk dapat mengoptimasikan pengekstraksian energi kinetik yang dimiliki oleh fluida yang mengalir melintasinya. Modifikasi dari sudu rotor merupakan salah satu pilihan untuk mengoptimalkan ekstraksi energi yang dilakukan oleh suatu *Vertical Axis Wind Turbine* / VAWT . Secara garis besar, ada dua jenis rotor yang ada pada VAWT yaitu jenis Darrieus dan Savonius. Kedua jenis rotor ini memiliki cara pengekstraksian yang berbeda pula. Dimana Rotor Darrieus menggunakan gaya angkat (*lift force*) yang tercipta aliran angin yang mengalir pada sekitar sudunya yang berbentuk *airfoil* untuk berputar. Sementara itu rotor Savonius yaitu rotor turbin vertikal yang sudunya berbentuk huruf S, menggunakan perbedaan gaya *drag* (*drag force*) yang tercipta pada bagian area frontal dari sudu.

Salah satu keunggulan VAWT dibandingkan dengan adalah kemampuannya untuk melakukan ekstraksi energi walaupun menerima aliran angin dari mana saja. Atas dasar hal ini, penggunaan VAWT sangat menguntungkan bila digunakan pada tempat-tempat yang memiliki area instalasi turbin angin yang terbatas namun memiliki potensial untuk mendapatkan energi yang besar. Contohnya adalah pemanfaatan VAWT yang diinstalasikan pada Jembatan Suramadu yang mana seperti diketahui Jembatan Suramadu memiliki potensi besar untuk energi angin yang mampu di ekstrak. Hal ini dikarenakan pengaruh dari angin lokal yang begitu besar. Selanjutnya, energi yang diekstrak ini dapat dimanfaatkan untuk memberikan daya pada lampu-lampu penerangan sepanjang Jembatan Suramadu

Memodifikasi rotor pengekstrak energi merupakan salah satu cara untuk mengoptimalkan penggunaan VAWT. Turbin dengan rotor jenis Darrieus, mempunyai hubungan yang erat

dengan *aspect ratio* turbin terkait dengan performa yang mampu dihasilkan instalasi turbin. *Aspect ratio* adalah perbandingan antara tinggi dari rotor terhadap jarak dari pusat rotor hingga sudu. Menurut penelitian yang telah dilakukan S. Brusca et al ( 2014 ), semakin kecil *aspect ratio* maka akan semakin besar *Reynolds Number* yang dihasilkan, sementara semakin besar *aspect ratio* akan berdampak pada semakin besarnya kecepatan putar. Kedua, sifat ini merupakan sifat penting yang sangat berpengaruh terhadap performa dari instalasi turbin Darrieus

Pada dasarnya tipe turbin Darrieus, memiliki kemungkinan sangat kecil untuk dapat bergerak sendiri. Hal ini dikarenakan torsi awal yang dihasilkan oleh turbin Darrieus sangat kecil. Tipe Darrieus turbin berdasarkan penelitian M. Bhutta et al (2011), yang me-review berbagai jenis VAWT merupakan tipe rotor turbin yang memiliki efisiensi paling tinggi diantara jenis VAWT yang ada. Hal ini dikarenakan, ukuran turbin sangat besar perbandingannya dengan energi yang dihasilkan. Kombinasi turbin Darrieus dengan penambahan rotor Savonius merupakan pilihan untuk meningkatkan performa dari turbin tipe Darrieus. Dengan mengkombinasikan kedua jenis turbin ini, maka dapat terbentuk suatu instalasi turbin baru dimana rotor Savonius dapat berfungsi sebagai penggerak utama dan rotor Darrieus sebagai penggerak tambahan.

Penambahan jumlah *stage* pada instalasi turbin dapat menjadi salah satu bentuk modifikasi lain untuk meningkatkan performa dari turbin. Dengan penambahan *stage* baru. Maka, diharapkan dapat memberikan kemampuan tambahan dalam ekstraksi energi. Hal ini dikarenakan energi kinetik yang dimiliki oleh angin yang melintasi instalasi turbin dapat diekstraksi menggunakan sapuan turbin angin secara lebih kontinyu. Penelitian tentang hal ini telah banyak dilakukan pada turbin jenis Savonius. Namun, seharusnya hal ini berlaku juga untuk turbin jenis Darrieus.

Pada penelitian kali ini, penulis akan melakukan studi numerik dengan model 3 dimensi kombinasi turbin dengan rotor



Darrieus dan rotor Savonius dengan memvariasikan jumlah stage dari rotor Darrieus. Terkait dengan efek dari *aspect ratio*-nya, pada penelitian kali ini, variasi sudu Darrieus yang digunakan adalah tipe *single stage* dengan 3 sudu dan *dual stage* dengan 3 sudu. Kedua variasi ini akan dikombinasikan dengan turbin Savonius 2 sudu tipe *dual stage* yang kemudian dari penelitian ini didapatkan hasil nilai torsi dan koefisien daya sehingga dapat ditentukan yang mana dari kedua variasi tersebut, merupakan turbin yang mampu mengekstraksi energi angin yang paling optimal.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah interaksi aliran angin yang mengalir melalui rotor Darrieus dan Savonius dalam instalasi turbin angin Darrieus - Savonius?
2. Bagaimanakah pengaruh penambahan *stage* dengan rotor Darrieus terhadap instalasi turbin angin Darrieus - Savonius?
3. Bagaimanakah pengaruh panjang *chord* dari sudu rotor Darrieus?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kontur aliran angin yang mengalir melalui instalasi turbin angin Darrieus– Savonius
2. Membandingkan performa dari tipe rotor Darrieus *single stage* dan *dual stage* pada instalasi turbin angin Darrieus - Savonius
3. Mengetahui torsi dan koefisien daya yang optimal dari penambahan rotor berbentuk Darrieus dalam instalasi turbin angin Darrieus-Savonius
4. Mengetahui dan membandingkan torsi dan koefisien daya dari penambahan panjang sudu rotor Darrieus

#### 1.4 Batasan Masalah

Pada studi numerik ini terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhatikan yaitu:

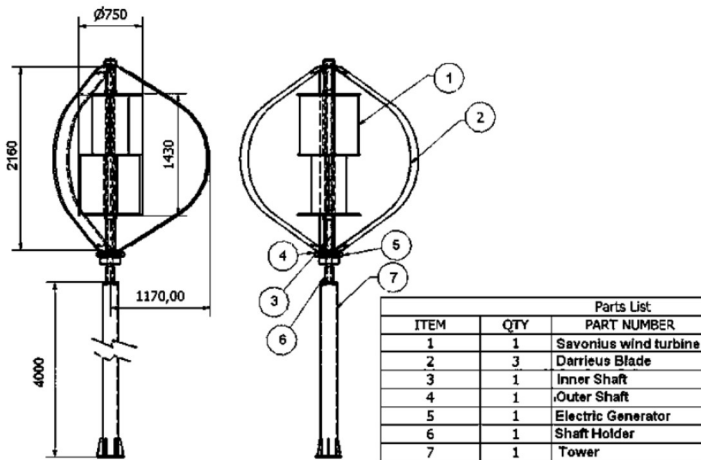
1. Turbin yang digunakan merupakan kombinasi antara turbin Darrieus dan Savonius dimana turbin Savoniusnya merupakan turbin *dual stage* dimana masing-masing *stage* memiliki 2 buah sudu Savonius. Sementara turbin Darrieus memiliki 3 buah sudu dan bervariasi antara *single stage* dan *dual stage*
2. Sudu pada rotor Darrieus dari turbin angin Darrieus – Savonius divariasikan panjang *chord*-nya dengan panjang *chord* 1cm dan 2cm
3. Studi numerik *unsteady* dilakukan pada penampang tiga dimensi
4. Aliran fluida *inlet* diasumsikan konstan dan *incompressible*
5. *Software* yang digunakan adalah STAR-CCM+ 9.02.007-R8
6. Putaran turbin disimulasikan sebagai *rotating motion* yang diatur kecepatan putarnya
7. Penyangga atau *support* sudu diabaikan
8. Data kecepatan angin yang digunakan diasumsikan satu arah yaitu dari arah inlet
9. Studi numerik tidak mengikutsertakan analisis bahan yang dipakai pada instalasi turbin angin
10. Getaran pada instalasi turbin angin tidak diikutsertakan pada studi numerik.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

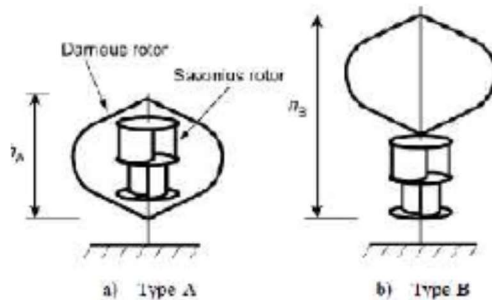
### 2.1 Tinjauan Pustaka

#### 2.1.1. Dwiyantoro et. al. (2015)

Dwiyantoro et. al. (2015) melakukan penelitian eksperimen pada suatu rotor turbin angin Darrieus – Savonius. Tujuannya untuk mencari desain optimal dari suatu pembuatan turbin *hybrid* dengan sumbu vertikal. Dikatakan *hybrid* karena turbin ini menggabungkan dua jenis rotor konvensional yaitu Darrieus dan Savonius menjadi satu instalasi turbin. Dalam gambar 2.1 adalah instalasi turbin yang digunakan pada penelitian ini.



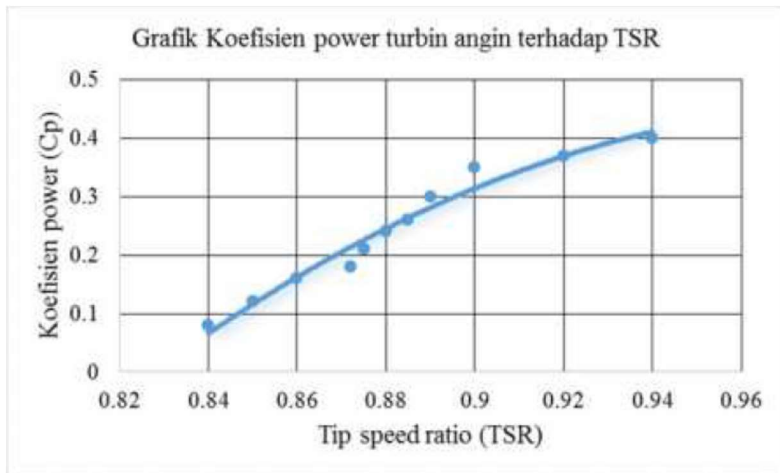
Gambar 2.1 Desain VAWT Darrieus – Savonius Dwiyantoro et. al. (Dwiyantoro et. al. 2015)



Gambar 2.2 2 tipe turbin *hybrid* yang pernah dilakukan uji eksperimen (Dwiyantoro et. al. 2015)

pada penelitian ini terdapat dua jenis turbin angin *hybrid* yang diteliti dimana tipe a diletakkan rotor savonius ditengah turbin Darrieus jenis *eggbeater*. Sementara tipe b rotor Savonius diletakkan dibawah rotor Darrieus. Dari percobaan *wind tunnel* yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa tipe b mampu mengesktrak daya yang lebih besar. Namun, hasil percobaan turbin pada dimensi yang berbeda menyimpulkan penurunan yang signifikan bila terjadi hembusan angin yang pendek. Sehingga, turbin angin tipe a lebih baik digunakan untuk turbin angin tunggal karena mempunyai performa yang konsisten, sementara turbin angin tipe b lebih bak digunakan pada ukuran turbin angin yang kecil.

Penelitian yang dilakukan selanjutnya pada penelitian ini terkait dengan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin tersebut gambar 2.3 menunjukkan hubungan antara koefisien daya dan *tip speed ratio* dari instalasi turbin yang dipakai.



Gambar 2.3 grafik hubungan koefisien daya turbin angin *hybrid* Darrieus – Savonius terhadap TSR (Dwiyantoro et.al. 2015)

hasil dari penelitian pada turbin tipe a diatas menunjukkan peningkatan koefisien daya yang terjadi pada instalasi turbin. Hal ini dikarenakan semakin besar kecepatan maka semakin besar pula koefisien daya yang dapat dihasilkan. Dwiyantoro et al kemudian menyimpulkan bahwa desain turbin hasil penelitian mereka dapat menghasilkan daya 500 Watt pada kecepatan angin 7.5 m/s

### 2.1.1. Kumar et. al. (2014)

Dalam penelitian ini, Kumar et. al. (2014) melakukan review terhadap *kinetic turbine rotor* yang mengalami kombinasi rotor (*hybrid*). Dalam membuat desain dari suatu *turbine rotor* harus diperhatikan fluida yang melintas. Densitas dari fluida yang melintas dapat mempengaruhi konstruksi dari pembuatan turbin angin. *combined rotor* atau sering disebut sebagai *hybrid rotor*

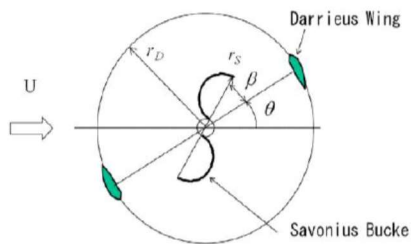
dipertimbangkan agar dapat menanggulangi kelemahan masing-masing rotor. Pada *hybrid rotor* yang paling sering digunakan adalah jenis rotor Darrieus dan jenis rotor Savonius. Pada kasus ini misalnya, kedua rotor ini saling melengkapi dimana rotor Savonius menanggulangi ketidakmampuan rotor Darrieus bekerja pada TSR kecil, sementara rotor Darrieus menanggulangi ketidakmampuan rotor Savonius bekerja pada TSR yang lebih tinggi.

Berikut adalah beberapa review yang telah dilakukan dari beberapa turbin *hybrid* yang diberikan oleh Kumar et. al. (2014) pada penelitiannya:

1. Two - bladed Darrieus and Savonius rotor

Turbin kombinasi Darrieus – Savonius diajukan untuk meningkatkan torsi awal yang dimiliki oleh turbin Darrieus. Pada konfigurasi ini, Kyojuka et al menggunakan sebuah turbin dengan 2 sudu pada bagian darrieus dan Savoniusnya

Secara keseluruhan, performa dari turbin ini mengalami peningkatan sedikit. Pada torsi awal yang dihasilkan, terjadi peningkatan performa. Namun, dari segi koefisien daya mengalami penurunan hingga 70 % dibandingkan dengan rotor darrieus biasa. Konfigurasi yang ditawarkan Kyojuka et al adalah seperti gambar 2.4

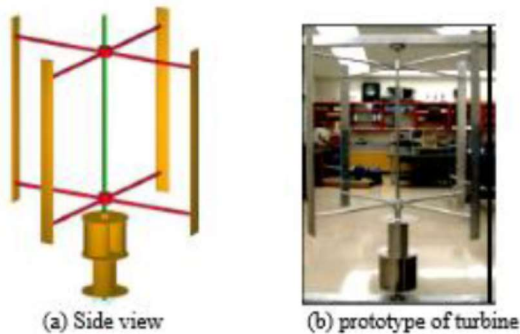


Gambar 2.4 konfigurasi kombinasi antara *Darrieus wings* dengan Savonius (Kumar et. al. 2014)

2. Straight bladed Darrieus and two stage Savonius Hybrid rotor

Alam M.J et al membuat desain sebuah rotor turbin *hybrid* untuk digunakan pada aliran air. Pada penelitian eksperimentalnya, ia menggunakan model rotor dengan sudu Darrieus berjumlah 4 yang digabungkan dengan sebuah rotor Savonius dua *stage*. Dua rotor ini diletakkan pada sumbu yang sama namun berada pada level yang berbeda untuk memaksimalkan torsi awal hasilan. Bentuk geometri dari turbin dapat dilihat pada gambar 2.5

Dari penelitian yang telah dilakukan, rotor *hybrid* yang telah diteliti mampu bekerja pada *cut in speed* 0.3 m/s pada air yang mengalir. Hal ini menandakan bahwa untuk penggunaan pada fluida air, starting torque yang dihasilkan adalah sangat cepat. Selain itu penelitian ini juga merekomendasikan dalam hal desain untuk menggunakan perbandingan rasio radius dari turbin Darrieus serta penentuan posisi kedua rotor sebaiknya.



Gambar 2.5 turbin air dengan rotor Darrieus-Savonius  
(Kumar et.al. 2014)

### 3. ERIGEN combined Darrieus – Savonius Rotor

Sebuah turbin angin *hybrid* digunakan pada suatu sistem telekomunikasi di Swedia. Sebuah pembangkit energi ERGIEN harus mampu bekerja pada mandiri dalam jangka waktu yang lama

pada suatu tempat yang sulit dijangkau oleh manusia. Di Swedia, turbin *hybrid* dengan sudu rotor 3 berbentuk Darrieus dengan rotor Savonius *dual stage* digunakan untuk suatu sistem daya penggerak alat telekomunikasi. Hasilnya, tidak disangka – sangka bahwa energi angin yang digunakan sebagai penggerak rotor dapat membuat dayaangkitan pada tempat yang sulit dijangkau. Hal ini dikarenakan oleh profil aerodinamis dari sebuah rotor Darrieus. Dari instalasi ini, dapat dilihat bahwa Savonius menggerakkan rotor pertama-tama pada kecepatan angin 3m/s dan Darrieus bekerja optimal pada 4 m/s. Namun, kecepatan rata-rata dari angin sekitar pada instalasi turbin adalah sekitar 3.5 m/s



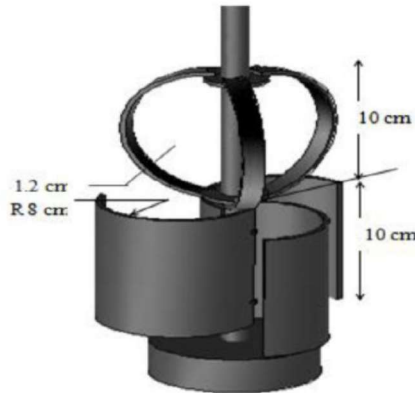
Gambar 2.6 turbin angin ERIGEN yang diujikan pada tegangan tinggi (Kumar et. al. 2014)

#### 4. Three – bladed combined Savonius Darrieus rotor

Suatu percobaan eksperimental dilakukan untuk mengukur sebuah peningkatan performa dari suatu rotor Darrieus – Savonius dengan Darrieus diletakkan pada bagian atas Savonius yang kedua rotor tersebut memiliki 3 sudu. Studi eksperimental ini menggunakan suatu model yang diletakkan pada terowongan angin dengan variasi *bucket overlapping* dari 9.3%, 13.8%, 16,8%,



18.3%, dan 24,8%. Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan koefisien daya yang dihasilkan adalah sebesar 0.62 pada TSR 0.62 dengan variasi optimum pada *bucket overlapping* sebesar 16.8%.



Gambar 2.7 konfigurasi turbin dengan variasi *bucket overlapping* (Kumar et. al. 2014)

##### 5. Four – bladed Darrieus and two stage Savonius

Pada penelitian kelanjutan dari turbin air yang dilakukan oleh Alam et. al., model yang digunakan adalah berupa *4 bladed Darrieus rotor* yang digabungkan dengan *dual stage Savonius* pada satu poros yang permanen dimana rotor savonius diletakkan diantara rotor Darrieus. Studi eksperimental yang telah dilakukan digunakan sebuah model *foam* dengan kecepatan air maksimum adalah sebesar 0.8 m/s untuk menjaga kestabilan struktur. Hasil dari percobaan eksperimental yang telah dilakukan didapatkan bahwa konfigurasi *hybrid* yang telah dilakukan mampu menghasilkan energi sebesar 21.3 W pada kecepatan maksimumnya di 0.8 m/s. Untuk daya yang mampu dihasilkan pada kecepatan rendah yaitu 0.2 m/s adalah sebesar 0.74 watt. Padahal, rotor Savonius didesain agar bisa menghasilkan daya

sebesar 2.013 Watt. Namun, *start up* dari konfigurasi ini tidaklah buruk karena mampu membuat turbin Darrieus menghasilkan daya yang terus meningkat pada kecepatan 0.6 m/s. Rekomendasi dari penelitian yang telah dilakukan yaitu konfigurasi turbin ini sebaiknya digunakan pada kecepatan air yang rendah.



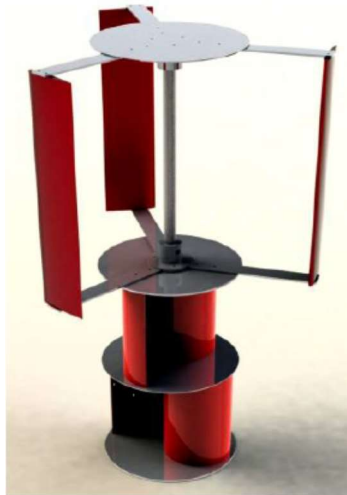
Gambar 2.8 konfigurasi turbin dengan rotor *hybrid* Darrieus dan Savonius (Kumar et. al. 2014)

#### 6. Three – bladed straight Darrieus with two stage Savonius configuration

Letcher, T. mengajukan sebuah desain rotor *hybrid* untuk turbin angin dengan skala kecil, dimana rotor Darrieus dengan jumlah sudu 3 diletakkan diatas Savonius dengan *dual stage*. Studi eksperimental yang dilakukan menggunakan rotor Savonius berbahan PVC dan sudu Darrieus berbahan fiberglass yang dibuat secara *custom*. Kemudian eksperimen dilakukan pada sebuah terowongan angin dengan kecepatan konstan pada variasi kecepatan 5 mph, 8 mph, 11 mph, dan 13 mph. Analisa juga dilakukan dengan berbagai profil sudu NACA 0015, pada sudut *pitch* 3° dan 4.5°, kemudian S 2027 ( 12° ). Dan dari Variasi

tersebut, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi yang mampu menghasilkan energi terbanyak adalah sudu dengan profil S2027 dengan panjang *chord* 4.5" dengan sudut *pitch* 0° dan diameter Darrieus 12".

Selain itu penelitian ini juga melakukan *review* perbandingan antara turbin WINDSPIRE yang terdiri dari rotor Darrieus. Hasilnya, meski tinggi rotor turbin hanya 12 ft, produksi daya listrik yang tercipta mampu lebih tinggi daripada turbin WINDSPIRE yang tingginya mencapai 20 ft. Tabel 2.1 merepresentasikan perbandingan performa rentang kerja masing-masing jenis rotor. Hasilnya, dapat disimpulkan bahwa rotor jenis Darrieus – Savonius mampu bekerja dengan rentang kerja yang panjang sehingga dapat disimpulkan mengalami peningkatan performa dibandingkan rotor tidak *hybrid*.



Gambar 2.9 representasi model turbin Letcher T. (Kumar et. al. 2014)

Tabel 2.1 perbandingan performa suatu turbin vertikal skala kecil  
(Kumar et. al. 2014)

Turbine rotor	Darrieus (3-4 blade)	Savonius (1-2 stages)	Darrieus Savonius Hybrid Rotor
Power coefficient	0.23-.42	0.20-0.5	0.20-0.53
Torque coefficient	0.1-0.11	0.09-0.1	0.06-0.13
TSR	1.5-2.5	0.6-0.8	0.6-3.1

Selain melakukan *review* terhadap berbagai jenis turbin angin. Terdapat juga studi mengenai persamaan – persamaan matematis yang baik dipakai sebagai parameter desain and performa dari suatu turbin *hybrid*. Persamaan yang sebaiknya dipakai untuk menghitung daya keluaran dan TSR adalah sebagai berikut

$$P = 0.5 * \rho * V^3 * (A_s C_{ps} + (A_d - A_s) * C_{pd})$$

$$TSR (\lambda) = \frac{\omega R}{V}$$

Dimana

$A_s$  = luas bentangan Savonius in  $m^2$

$A_d$  = luas bentangan dari rotor Darrieus in  $m^2$

$C_{ps}$  = koefisien daya dari rotor Savonius

$C_{pd}$  = koefisien daya dari rotor Darrieus

$\rho$  = masa jenis ( $kg/m^3$ )

$\omega$  = kecepatan putar poros (rad/s)

$\lambda$  = TSR dari turbin *hybrid*

$R(R_d)$  = radius putar maksimum (radius putar Darrieus)

selain itu, untuk persamaan yang bisa digunakan untuk menghitung torsi turbin kombinasi ini dapat digunakan persamaan

$$Q_T = Q_S + Q_D$$

Dimana,  $Q_T$  adalah torsi dari rotor yang terkombinasi,  $Q_S$  adalah torsi dari rotor Savonius, dan  $Q_D$  adalah torsi dari rotor Darrieus. Selain itu total dari kedua rotor ini hubungannya terhadap koefisien torsi gabungan dari rotor dapat ditulis dalam persamaan

$$Q_T = \frac{1}{2} \rho A_T R_T C_{qT}$$

koefisien torsi dari turbin gabungan  $C_{qT}$  dapat dihitung menggunakan persamaan

$$C_{qT} = C_{qS} \frac{A_S D_S}{A_T R_T} + C_{qD} \frac{A_D R_D}{A_T R_T}$$

Dimana,

$R_D$  = a jari-jari Darrieus

$A_D$  = luas bentangan turbin Darrieus

$D_S$  = diameter dari rotor Savonius

$R_T$  = jari-jari rata-rata kombinasi

$A_T$  = luas bentangan dari kombinasi mesin

Kemudian koefisien daya dapat dinyatakan

$$C_{PT} = \lambda C_{qT}$$

Dimana  $C_{PT}$  adalah koefisien daya dari turbin kombinasi. Sementara  $\lambda$  (TSR) dapat dihitung menggunakan radius yang sama pada persamaan perhitungan TSR dari rotor Darrieus.

### 2.1.3. Gosselin et. al. (2016)

Penelitian yang dilakukan oleh Gosselin et. al. (2016) adalah penelitian parametrik yang dilakukan secara numerik untuk meneliti tentang efek penambahan aspek- aspek tertentu pada sebuah turbin Darrieus jenis rotor H. Pada penelitian 3 dimensi yang dilakukan, Gosselin et. al. (2016) dalam penelitiannya melakukan simulasi 3 dimensi tentang efek perbedaan *aspect ratio* sudu dari turbin dan efek dari *end plate* pada sudu Darrieus.

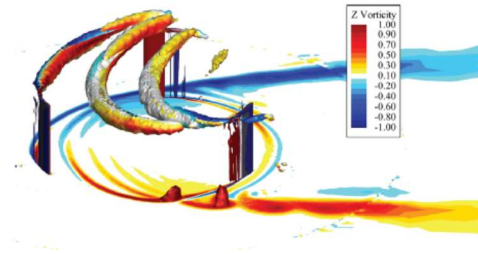
Simulasi 3 dimensi dilakukan dengan menggunakan *single blade* berjenis NACA0015 dengan variasi *aspect ratio*  $AR = \text{tinggi sudu} / \text{Radius} = 7$  dan  $AR = 15$ . Kemudian simulasi dilakukan pada *solidity*  $\sigma = 0.2857$  dan pada  $\lambda = 4.25$  dan  $Re = 2.5 \times 10^5$ . Selain itu dilakukan juga simulasi dengan 3 sudu dengan  $AR = 7$ , dan  $\sigma = 0.5486$ , pada TSR  $\lambda = 3.4$  (efisiensi puncak). Hasil dari efek *aspect ratio* pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.2 pengaruh *aspect ratio* terhadap hasil 2D (Gosselin et. al. 2016)

Turbine	Number of blades	$\overline{C_p}$	3D/2D performance ratio (%)
2D	1	0.38	...
$AR = 7$	1	0.16	41.8
$AR = 15$	1	0.26	69.0
2D	3	0.35	...
$AR = 7$	3	0.19	53.7

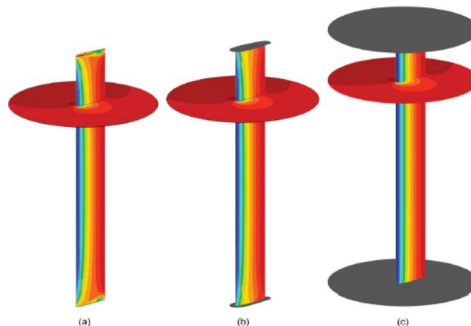
Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan antara hasil penelitian yang dilakukan secara 2 dimensi dan 3 dimensi terkait dengan koefisien daya rata-rata yang dihasilkan oleh sudu. Hal ini menunjukkan bahwa performa dari suatu turbin angin Darrieus sangat ditentukan oleh *aspect ratio* dari instalasi turbin. Pada gambar 2.10 dapat dilihat bagaimana *vorticity* aliran udara pada ujung sudu berbeda dengan aliran yang terdapat pada bagian

tengah turbin. Atas dasar alasan inilah mengapa performa turbin dapat turun pada simulasi 3 dimensi



Gambar 2.10 Gambar *isosurface* dari turbin angin 3 D pada TSR  $\lambda = 3.4$  dengan jumlah sudu 3 dan AR = 7. (Gosselin et. al. 2016)

Untuk menganalisa terjadinya efek dari penambahan *end-plate*, penelitian dilakukan pada suatu *single blade* dengan 3 macam variasi yaitu tanpa *end-plate*, dengan *end-plate* NACA yaitu sebuah plat berbentuk mirip sudunya dengan pertambahan tebal sebesar 1.15 kali panjang *chord*, dan sebuah plat berbentuk lingkaran dengan diameter lingkaran sebesar 4 kali panjang *chord* airfoil.



Gambar 2.11 Gambar kontur tekanan yang ada disekitar permukaan sudu (a) tanpa *end-plate* (b) dengan *end-plate* NACA (c) dengan *end-plate* lingkaran (Gosselin et. al. 2016)

Pada tabel 2.3 dapat dilihat bagaimana hasil dari studi numerik yang telah dilakukan terkait kontur tekanan yang dimiliki masing-masing sudu dengan tambahan *end-plate* tersebut. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa hasil dari penambahan plat jenis NACA adalah tambahan yang paling optimal dengan penambahan performa sebesar 10% dibandingkan dengan yang tanpa *end-plate*. Hal ini menunjukkan bahwa adanya *end-plate* dapat meningkatkan performa dari suatu turbin angin sumbu vertikal dimana *aspect ratio* terbatas. Tetapi desain dan ukuran dari *end-plate* sangatlah penting, apabila terlalu besar (*oversized*) *end-plate* malah membuang terlalu banyak energi daripada yang dibutuhkan.

Tabel 2.3 tabel perbandingan numerik performa dari turbin 3D dengan penambahan *end-plate* dengan hasil 2D (Gosselin et. al. 2016)

Turbine	End-plate	Total $\overline{C_P}$	3D/2D performance ratio (%)	End-plate $\overline{C_P}$ cost
2D	...	0.378	...	...
AR = 7	None	0.158	41.8	...
AR = 7	Circular	-0.105	...	0.409
AR = 7	"NACA"	0.188	49.7	0.017

Pada penelitiannya Gosselin et. al. (2016) menyebutkan kesulitannya memvalidasi hasil yang ditemukan melalui simulasi numerik dengan eksperimen pada TSR rendah. Pada TSR yang tinggi (TSR = 4 – 6), sudu Darrieus tidak lagi mengalami efek stall yang seringkali ditemukan pada TSR rendah (TSR = 1 – 3). Pada TSR rendah, simulasi numerik memiliki keterbatasan tertentu untuk membaca efek *stall* yang terjadi disekitar sudu Darrieus. Hal ini dikarenakan, *angle of attack* yang ditemukan pada turbin yang berputar berubah hampir secara instan dan kecepatan relatif disekitar sudu yang bervariasi. Atas dasar kedua hal ini, Gosselin et. al. merekomendasikan untuk turbin yang beroperasi pada TSR rendah, maka turbin sebaiknya didesain menggunakan nilai *solidity*

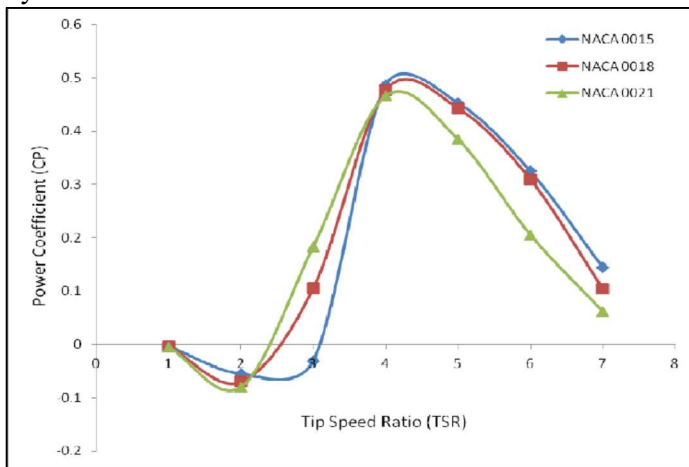


yang tinggi ( $\sigma = 0.5$ ). Nilai ini dapat dicapai baik dengan penambahan jumlah sudu maupun dengan pengurangan panjang rotor Darrieus.

#### 2.1.4. Kanyako et. al. (2014)

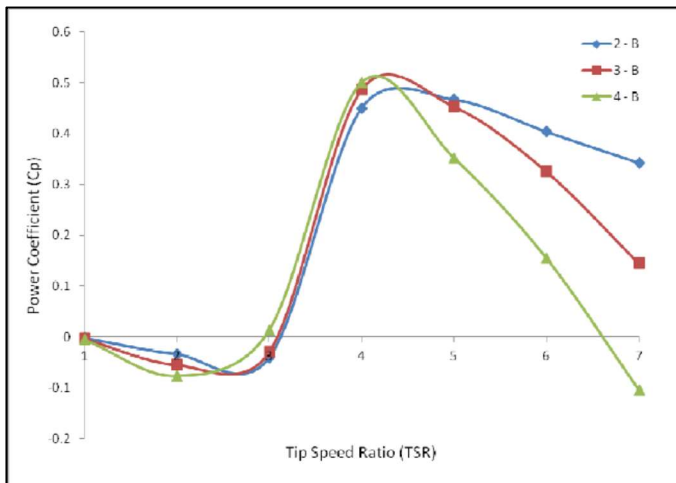
Penelitian yang dilakukan oleh Kanyako et. al. (2014) adalah eksperimen terhadap turbin angin Darrieus secara numerik dalam penampang 2 D. Penelitian ini juga bertujuan untuk menilai bagaimana performa turbin Darrieus dari TSR rendah hingga TSR tinggi. Performa tersebut divariasikan berdasarkan jenis profil *chord* sudu, Jari – jari turbin dan jumlah sudu dari turbin Darrieus.

Hasil dari variasi *chord* menunjukkan tren koefisien daya yang menurun pada rentang TSR 1 -2 untuk profil jenis NACA 0018 dan NACA 0021. Sementara NACA 0012 baru membuat tren koefisien daya yang meningkat pada TSR sekitar 2.8. Ketiga profil ini menunjukkan koefisien daya yang negatif pada TSR tersebut. Artinya rotor Darrieus tidak memiliki kemampuan untuk self-starting. Selain itu, penambahan ketebalan dari profil sudu juga meningkatkan kemampuan *self – starting*nya hal ini dapat dilihat pada gambar 2.12 bagaimana NACA 0021 mendapati hasil yang positif pada TSR yang lebih kecil disbanding dengan dua profil lainnya.



Gambar 2. 12 Grafik koefisien daya terhadap torsi untuk masing – masing jenis profil sudu Darrieus (Kanyako et. al. 2014)

Gambar 2.13 menunjukkan grafik koefisien daya terhadap TSR untuk variasi jumlah sudu turbin yang berbeda – beda. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan jumlah sudu berjumlah tiga adalah yang terbaik untuk mengekstraksi energi angin yang melintas.



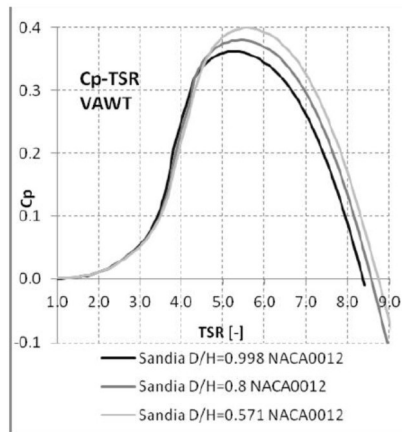
Gambar 2. 13 Grafik koefisien daya terhadap TSR dengan variasi jumlah sudu (Kanyako et. al. 2014)

### 2.1.5. Ionescu et. al. (2014)

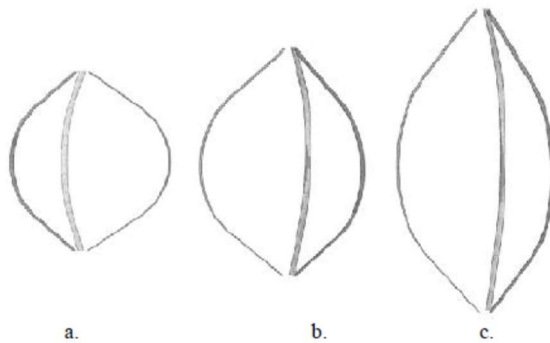
Dalam penelitian ini, dilakukan sebuah investigasi terhadap keefektifan turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus dengan rotor SANDIA berdiameter 2m yang telah dilakukan secara eksperimental. Analisa yang dilakukan untuk menginvestigasi hal tersebut dilakukan secara numerik, menggunakan perangkat lunak khusus untuk analisa rotor turbin angin yaitu QBlade. Qblade adalah perangkat lunak yang dapat digunakan secara gratis yang

analisisnya dilakukan berdasarkan *Blade-Element Momentum* dan teori *double-multiple streamtube* yang pernah dikemukakan oleh Paraschivoiu et. al. pada tahun 2002. Studi ini, bertujuan untuk mencari cara untuk meningkatkan karakteristik dari turbin angin dengan mengubah *aspect ratio* dan profil dari rotor Darrieus.

Analisa yang dilakukan kali ini, menggunakan variasi *aspect ratio* diameter/tinggi 0.998, 0.8, 0.571. Analisa awal dilakukan dengan menggunakan profil NACA 0012 dan dalam membuat variasi *aspect ratio* yang berbeda, pembuatan model dilakukan hanya dengan mengubah tinggi dari rotor. Hasil dari analisa terhadap koefisien daya yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 2.14



Gambar 2.14 grafik perbandingan antara koefisien daya yang dihasilkan oleh tiap *aspect ratio* yang berbeda terhadap TSR (Ionescu et. al. 2014)



Gambar 2.15 model yang digunakan dalam analisa (a)  $D/H = 0.998$ , (b)  $D/H = 0.8$ , (c)  $D/H=0.571$  (Ionescu et. al. 2014)

Hasil yang dapat diambil dari analisa studi yang telah dilakukan terhadap perbedaan *aspect ratio* ini yaitu semakin kecil *aspect ratio* maka koefisien daya yang dihasilkan akan semakin besar. jadi akan meningkatkan performa dari rotor tersebut.

#### **2.1.6. Biswas et. al. (2014)**

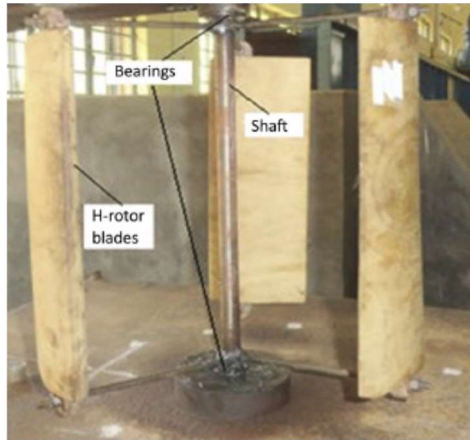
Dari kebanyakan jenis turbin angin bersumbu vertikal, H-rotor yang bergerak karena kekuatan lift memiliki kemampuan untuk mencapai koefisien daya yang tertinggi. Tetapi, dengan menggunakan airfoil simetris, torsi awal yang dihasilkan sangatlah buruk. Untuk itu, Biswas et. al. (2014), melakukan penelitian secara eksperimental merancang H-rotor baru menggunakan airfoil yang tidak simetris yaitu S818 *cambered* untuk melawan keburukan itu. Selain itu, ditambahkan juga sebuah rotor Savonius untuk membuat turbin ini benar-benar dapat bergerak sendiri. Airfoil tidak simetris sendiri sebenarnya dapat bergerak sendiri namun hanya dapat terjadi pada sudut azimuth tertentu. Dengan adanya penambahan rotor Savonius pada instalasi turbin ini maka diharapkan turbin ini dapat mencapai koefisien daya yang lebih teratur dan juga memiliki kemampuan *self-starting*.

Model dari eksperimen menggunakan sebuah rotor dengan 3 buah sudu airfoil NREL S818 yang terkoneksi pada satu poros yang sama. airfoil ini adalah airfoil *cambered* yang memiliki ketidaksimetrisan yang telah diteliti sebelumnya memiliki kemampuan untuk memberikan karakteristik terjadinya *self starting*. Kemudian diantara ketiga sudu terdapat rotor berbentuk Savonius dengan 2 sudu. konfigurasi dari eksperimen yang telah dilakukan. dapat dilihat pada gambar 2.16 dan 2.17 berikut.

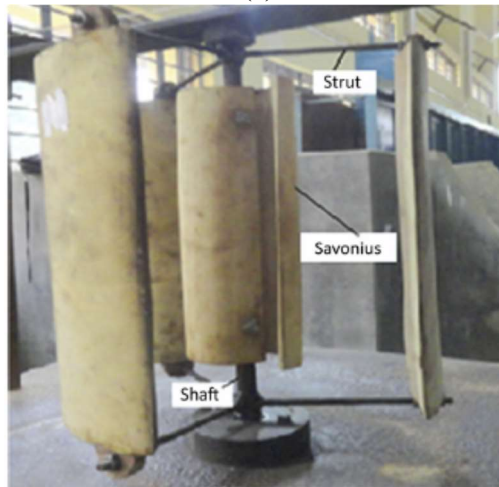
Rotor ini, nantinya akan diuji pada 4 bilangan Reynolds yaitu  $1.44 \times 10^5$ ,  $1.60 \times 10^5$ ,  $1.92 \times 10^5$  dan  $2.31 \times 10^5$ . Kemudian angin yang dilewatkan terowongan angin ini diatur agar sesuai dengan bilangan Reynolds tersebut. Kemudian, sedikit demi sedikit rotor dibebani untuk dapat melakukan pencatatan torsi. Skema eksperimen dari turbin ini dapat dilihat pada gambar 2.18. Selain melakukan eksperimen pada rotor *hybrid*, eksperimen juga dilakukan pada H-rotor yang lebih sederhana, guna dibandingkan hasilnya.

Hasil dari eksperimen ini menyatakan bahwa H-rotor sederhana yang memiliki profil airfoil asimetris mampu mengurangi ketidakmampuan H-rotor dengan profil simetris pada bagian torsi awal. Dapat dilihat pada gambar 2.19 dimana grafik menunjukkan adanya koefisien torsi yang tercipta pada sudut azimuth  $0^\circ$  hingga  $100^\circ$  dan pada sudut  $270^\circ$  hingga  $360^\circ$ . koefisien torsi tertinggi dari turbin H-rotor sederhana mencapai 0.21 pada  $Re\ 1.92 \times 10^5$ . pada bilangan Reynolds yang lebih tinggi rotor cenderung lebih rendah. Dengan penambahan rotor Savonius, dapat dilihat pada gambar 2.18, bahwa pada setiap bilangan Reynolds dan pada semua sudut Azimuth, rotor dapat menghasilkan torsi. Hal ini menandakan bahwa rotor dapat mencapai *selfstarting* pada sudut azimuth manapun. Dengan penambahan Savonius pula, rotor dapat menghasilkan koefisien torsi sebesar 0.29 pada bilangan Reynolds  $1.92 \times 10^5$ . Hal ini

menandakan adanya peningkatan performa untuk torsi yang dihasilkan oleh rotor dengan adanya penambahan rotor Savonius.

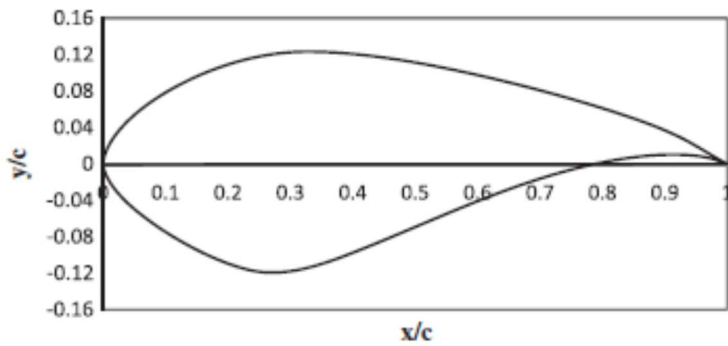


(a)

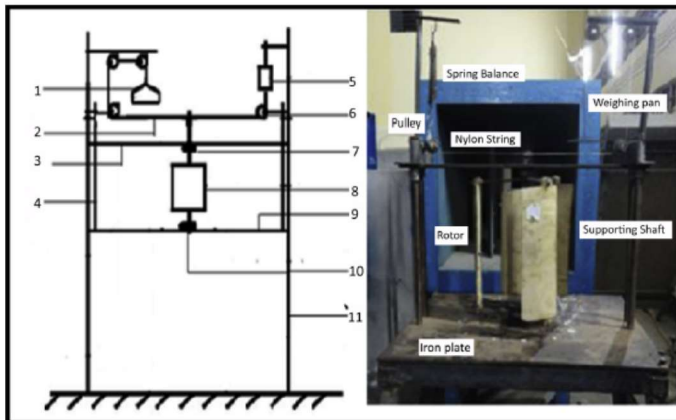


(b)

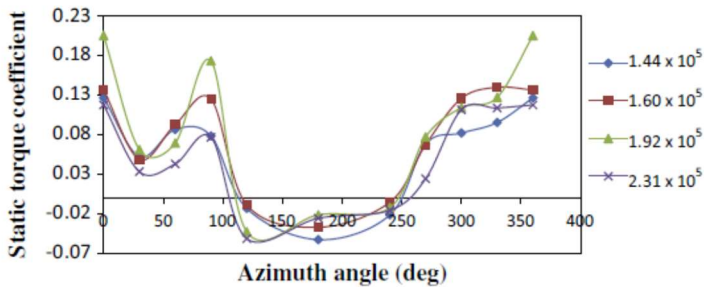
Gambar 2.16 rotor yang akan diuji (a) H-rotor Darrieus (b) *hybrid* rotor Darrieus - Savonius (Biswas et. al. 2014)



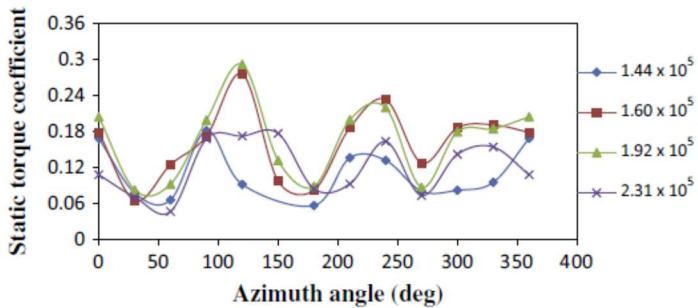
Gambar 2.17 profil NREL S818 sebagai sudu airfoil Darrieus (Biswas et. al. 2014)



Gambar 2.18 skema eksperimen dari turbin Darrieus- Savonius (Biswas et. al. 2014)



Gambar 2.19 grafik torsi hasil rotor Darrieus terhadap sudut azimuth pada bilangan Reynolds yang berbeda (Biswas et. al. 2014)

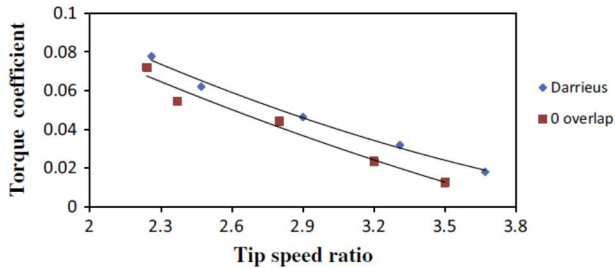


Gambar 2.20 grafik torsi hasil rotor *hybrid* Darrieus - Savonius terhadap sudut azimuth pada bilangan Reynolds yang berbeda (Biswas et. al. 2014)

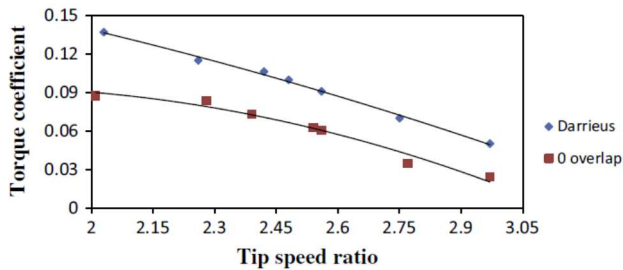
Berikutnya pada gambar 2.20 dapat dilihat perbandingan antara rotor Darrieus H-rotor sederhana dengan kombinasi Savonius. Selain itu dapat dilihat pula pada gambar 2.21 dan gambar 2.22 perbandingan antara koefisien daya yang dihasilkan oleh kedua rotor tersebut. Secara garis besar, rotor Darrieus memiliki kemampuan untuk menghasilkan daya yang lebih baik dibandingkan rotor *hybrid* meskipun rotor *hybrid* dapat menciptakan kemampuan *selfstarting*. Pada pengujian ini dapat



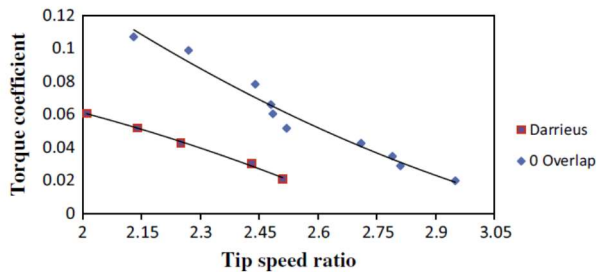
dilihat kedua jenis rotor mengalami penurunan performa ketika berada pada TSR yang semakin tinggi.



(a)

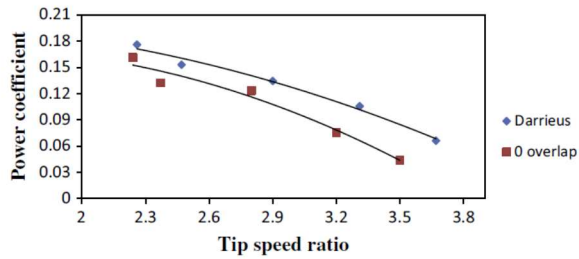


(b)

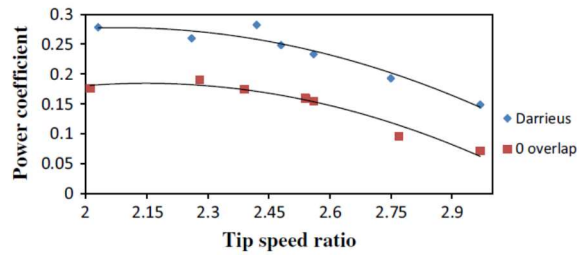


(c)

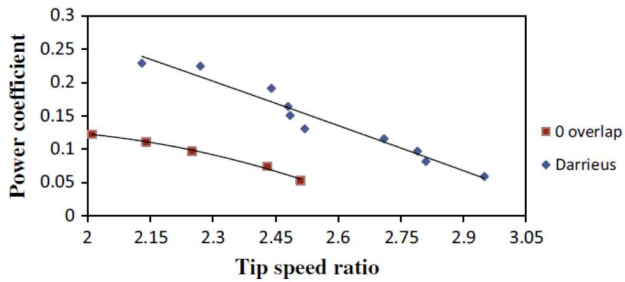
Gambar 2.21 grafik perbandingan antara koefisien torsi terhadap TSR antara rotor dengan tipe H-rotor Darrieus sederhana dengan turbin *hybrid* dengan Savonius tidak *overlap* pada (a)  $Re = 1.44 \times 10^5$  (b)  $Re = 1.92 \times 10^5$  (c)  $Re = 2.31 \times 10^5$  (Biswas et. al. 2014)



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.22 grafik perbandingan antara koefisien daya terhadap TSR antara rotor dengan tipe H-rotor Darrieus sederhana dengan turbin *hybrid* dengan Savonius tidak *overlap* pada (a)  $Re = 1.44 \times 10^5$  (b)  $Re = 1.92 \times 10^5$  (c)  $Re = 2.31 \times 10^5$  (Biswas et. al. 2014)

Dari eksperimen ini, maka dapat disimpulkan, dengan adanya penambahan rotor Savonius yang optimal pada instalasi rotor dapat membuat peningkatan performa daya hasil dari rotor dibandingkan jenis H-rotor darrieus sederhana.

## **2.2. Dasar Teori**

### **2.2.1. Potensi Energi Angin**

Energi angin adalah sumber daya energi yang tak dapat habis. Selain itu energi angin mampu diekstrak tanpa harus membuang polusi yang dapat mengganggu stabilitas lingkungan. Hal ini menjadikan energi angin menjadi energi alternatif yang berpotensi sangat besar dalam penggunaan jangka panjang.

Hembusan angin yang mengalir merupakan sumber daya energi angin sebenarnya. Angin yang berhembus menyimpan energi kinetik yang kemudian energi tersebut dapat diekstrak menjadi bentuk energi lain menggunakan fasilitas turbin angin. Suatu instalasi turbin angin akan terdiri dari rotor yang porosnya terhubung pada suatu generator sebagai pengkonversi energi angin menjadi energi listrik.

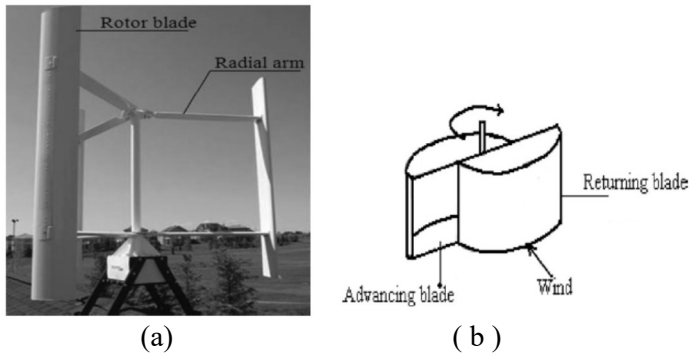
### **2.2.2. Turbin Angin Sumbu Vertikal**

Suatu instalasi turbin angin akan berfungsi sebagai suatu sistem konversi energi angin. Secara garis besar, turbin angin dapat dibedakan menjadi turbin angin dengan sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Turbin angin sumbu vertikal memiliki keunggulan yaitu dapat menerima hembusan angin dari segala arah. Karena hal inilah penelitian banyak dirujuk pada turbin angin sumbu vertikal karena mampu mengeliminasi luas areal sekitar turbin yang digunakan.

Turbin angin vertikal juga memiliki keunggulan dalam hal kestabilan struktur karena poros pemutar rotornya yang terletak dekat dengan tanah. Hal ini mengeliminasi kemungkinan terjadinya anggukan ( *sway* ) yang kerap kali terjadi pada turbin angin

dengan sumbu horizontal. Secara garis besar masih banyak keunggulan – keunggulan lain dari turbin sumbu vertikal dibandingkan sumbu horizontal. Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 2.4 berikut.

Pada awal pemakaian, bentuk dari geometri turbin angin vertikal merupakan jenis turbin yang menggunakan gaya *drag* angin terhadap rotor turbin untuk memutar rotor turbin. konsep dari geometri ini kemudian dikembangkan menjadi bentuk turbin angin modern yaitu jenis sudu Savonius. Yaitu jenis turbin angin yang memakai lembaran-lembaran plat melengkung untuk mendapatkan gaya *drag* maksimal. kemudian konsep geometri dari sudu turbin angin vertikal kemudian berkembang untuk mendapatkan efisiensi dari energi yang dapat diekstrak dengan membuat suatu sudu dengan profil airfoil yang tipis. Sehingga, turbin angin memanfaatkan gaya angkat ( *lift* ) yang dihasilkan oleh airfoil untuk memutar poros dari turbin angin



Gambar 2.23 macam-macam turbin angin bersumbu vertikal (a) Darrieus rotor , (b) Savonius rotor (Bhutta et. al. 2011)

### 2.2.3. Turbin Savonius dan Turbin Darrieus

Diantara banyak jenis turbin angin dengan sumbu vertikal, Turbin Savonius dan Turbin Darrieus adalah jenis

turbin angin sumbu vertikal yang paling banyak ditemui dan digunakan. Kedua jenis turbin ini memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Beberapa hal yang mempengaruhi performa dari kedua turbin ini adalah

1. Kecepatan aliran angin, kecepatan aliran angin adalah yang paling utama yang mempengaruhi performa turbin. Kecepatan angin yang rendah, menyebabkan turbin sulit untuk berputar karena torsi yang dihasilkan dari sudu turbin juga kecil
2. *aspect ratio* yaitu perbandingan antara tinggi dari sudu turbin dengan radius turbin itu sendiri. Pada kecepatan yang sama, jika *aspect ratio* semakin besar maka rotor akan semakin cepat berputar, demikian pula jika *aspect ratio* rendah maka rotor akan lebih lambat berputar namun tetap memiliki hasil torsi yang sama.
3. Modifikasi sudu, modifikasi sudu adalah salah satu cara meningkatkan performa dari suatu turbin angin. Modifikasi sudu ini dapat berupa pemberian *endplate* pada ujung atas dan ujung bawah turbin serta masih banyak lagi modifikasi sudu masing – masing jenis turbin yang dapat mempengaruhi performa dari suatu turbin.

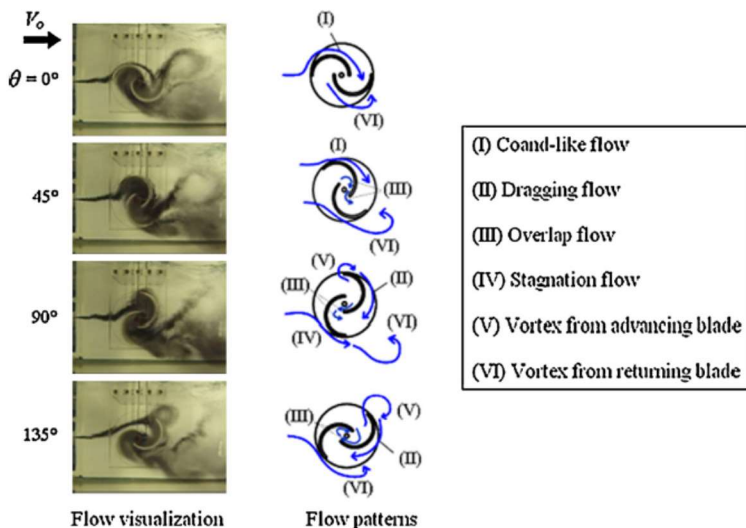
Tabel 2.4 Tabel perbedaan antara turbin angin sumbu vertikal dan sumbu horizontal (Bhutta et. al. 2011)

	Vertical axis wind turbine (VAWT)	Horizontal axis wind turbine (HAWT)
Tower sway	Small	Large
Yaw mechanism	No	Yes
Self starting	No	Yes
Overall formation	Simple	Complex
Generator location	On ground	Not on ground
Height from ground	Small	Large
Blade's operation space	Small	Large
Noise produced	Less	Relatively high
Wind direction	Independent	Dependent
Obstruction for birds	Less	High
Ideal efficiency	More than 70%	50–60%

### 2.2.3.1. Turbin Savonius

Turbin Savonius dipatenkan oleh S.J. Savonius pada tahun 1920. Tujuan awal dari pembuatan turbin jenis ini adalah mencari solusi alternatif mencari jenis energi yang terbaharukan dengan biaya minimal dan *impact* terhadap lingkungan yang minim. Turbin ini menggunakan sudu berupa lembaran berbentuk huruf S, umumnya rotor ini terdiri dari 2 sudu ataupun 3 sudu

Turbin Savonius bergerak karena adanya perbedaan gaya *drag* antara sudu 1 dengan sudu lainnya. Sudu Savonius sering dinamakan *bucket* berfungsi untuk memanipulasi gaya *drag* akibat angin yang mengalir sehingga dapat dikonversikan menjadi torsi. Gambar 2.24 berikut menunjukkan bagaimana angin dapat menimbulkan putaran pada turbin Savonius.



Gambar 2.24 bentuk aliran yang melintasi suatu rotor Savonius (Akwa et. al. 2012)

Untuk meningkatkan performa dari suatu rotor savonius, sesuai kebutuhan dapat dilakukan beberapa modifikasi. Diantaranya :

1. Mengubah *bucket spacing* dan *overlap ratio*. Pada turbin Savonius terdapat dua jenis sudu yaitu jenis sudu yang bertumpukkan melewati poros turbin (*Overlapping*) ada juga sudu yang sedikit menjauh dari turbin. kedua modifikasi ini berfungsi untuk mengurangi aliran yang *dragging* ketika aliran bebas ( *free stream* ) menghantam dinding sudu Savonius
2. Menambah jumlah sudu dan *stage*, penambahan jumlah sudu bertujuan untuk mencari posisi yang optimal dari suatu turbin dalam melakukan ekstraksi energi, demikian halnya penambahan *stage* pada suatu turbin diharapkan dapat membuat suatu ekstraksi energi yang kontinyu karena letak sudu berada pada ketinggian yang berbeda
3. Membuat bentuk sudu yang berbeda. Pada suatu turbin angin vertikal, umumnya ekstraksi energi pada turbin bagian dekat tanah menghasil energi yang lebih kecil karena kecepatan angin yang mengalir lebih rendah. Hal, inilah yang memicu untuk membuat sudu Savonius berbentuk *curved* , sehingga , sepanjang vertikal turbin dapat menghasilkan torsi yang serupa
4. Penambahan Stator, Stator adalah bodi statis tambahan dari suatu instalasi turbin, fungsi dari bodi ini adalah mengkonsentrasikan aliran yang akan melintasi sudu dari Savonius

#### 2.2.3.2. Turbin Darrieus

Pada tahun 1931, seorang insinyur bernama G. J. M. Darrieus mematenkan hasil karya turbinnnya yang bersumbu vertikal. Ide dari turbin ini sebenarnya adalah membuat suatu turbin yang desainnya sederhana dan mudah untuk dibuat. Desain

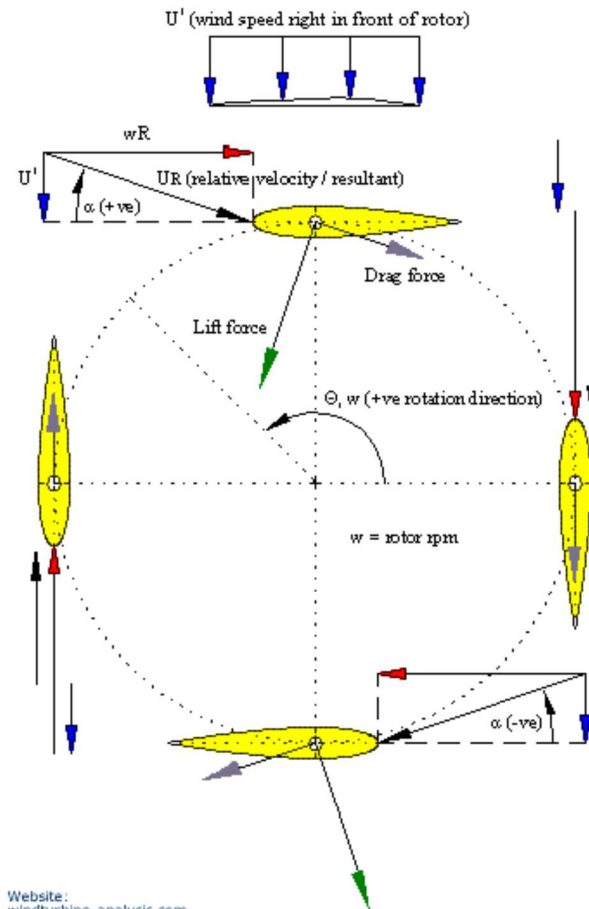
dari turbin ini menggunakan gaya *lift* yang tercipta dari sebuah airfoil untuk menciptakan putaran pada turbin.

Gaya *lift* yang tercipta pada turbin Darrieus, berbeda dengan gaya *lift* yang tercipta pada airfoil sayap pesawat terbang. Umumnya, agar mudah dibuat, airfoil yang digunakan pada turbin ini berbentuk simetris. Gaya *lift* yang tercipta dari airfoil yang terdapat pada turbin ini dikarenakan adanya perbedaan arah aliran yang terjadi disekitar turbin dengan yang melintasi turbin. Resultan hasil perbedaan arah ini menciptakan arah aliran baru yang memiliki *angle of attack* pada turbin Darrieus. Sesuai teori aerodinamika, salah satu syarat terjadinya *lift* pada sebuah airfoil yaitu adanya *angle of attack*. Hal ini menyebabkan perbedaan panjang lintasan diantara kedua sisi airfoil. Gambar 2.3 berikut menunjukkan bagaimana gaya *lift* tercipta pada suatu rotor Darrieus yang menyebabkannya berputar.

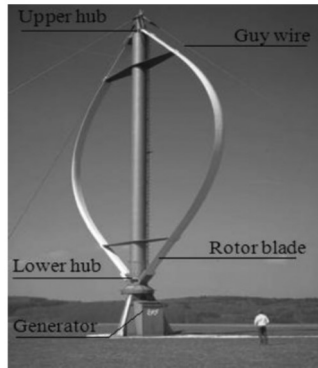
Turbin Darrieus memiliki beberapa model, diantaranya yang paling populer adalah model rotor H (*giromill*), dan model pengocok telur (*eggbeater*). Keunggulan dari turbin jenis Darrieus adalah bentuknya yang ringan, sehingga efisiensi hasil perbandingan antara torsi yang dihasilkan dengan beban turbin sangatlah besar. Hal inilah yang menjadi perhatian utama dalam pembuatan turbin Darrieus. Tetapi, karena turbin Darrieus harus mendapatkan aliran disekitar turbin untuk menciptakan gaya *lift*, turbin Darrieus tidak dapat bergerak sendiri dan membutuhkan dorongan awal untuk dapat bergerak terus menerus. Selain itu, bila kecepatan angin disekitar instalasi turbin rendah, maka rotor tidak dapat berputar untuk melawan torsi yang diperlukan memutar poros generator. Atas dasar inilah, turbin yang memiliki H-rotor diletakkan pada tempat yang lebih tinggi karena pada bagian dekat tanah angin cenderung lebih lambat untuk mengalir. sementara yang berbentuk pengocok telur (*eggbeater*) memiliki bentuk yang melengkung dibagian bawahnya sehingga torsi yang dihasilkan



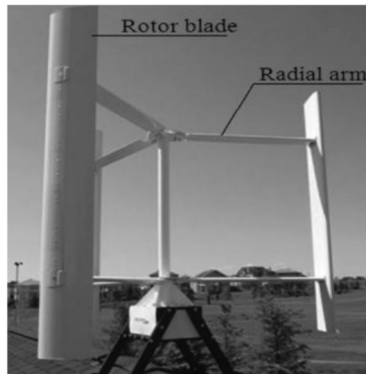
disepanjang tinggi sudu bisa serupa yang dapat memutar turbin lebih maksimal



Gambar 2.25 segitiga kecepatan disekitar airfoil turbin (<http://windturbine-analysis.com>)



(a)



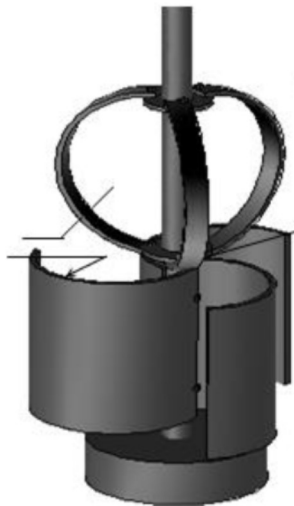
(b)

Gambar 2.26 beberapa contoh turbin Darrieus (a) tipe pengocok telur (*eggbeater*) dan (b) tipe rotor H (*giromill*) (Bhutta et. al. 2011)

#### 2.2.4. Turbin Darrieus – Savonius

Turbin Darrieus – Savonius, adalah turbin dengan rotor yang mengkombinasikan antara rotor Savonius dan rotor Darrieus. Tujuan daripada pengkombinasian kedua rotor ini adalah untuk mengeliminasi ketidakmampuan rotor Darrieus dalam torsi awal.

Rotor berbentuk Savonius dikopelkan pada rotor Darrieus pada satu poros yang sama. Rotor Savonius berfungsi sebagai penggerak utama dari turbin tersebut, dengan menjadi penggerak awal. Karena turbin Savonius bergerak karena adanya perbedaan gaya *drag* pada masing – masing sudu Savonius. Kemudian, dengan bantuan rotor Darrieus yang ringan namun memiliki kemampuan untuk menghasilkan torsi, turbin Darrieus – Savonius dapat mengekstraksi energi yang maksimal.



Gambar 2.27 Turbin Darrieus – Savonius (Kumar et. al. 2014)

### 2.2.5. Torsi dan Koefisien Daya

Pertimbangan utama dari suatu performa turbin angin adalah torsi hasilan dari rotor serta koefisien dayanya. Hal ini menunjukkan seberapa besar energi yang berhasil diekstrak dari instalasi rotor pada turbin. Secara teoritis, nilai koefisien daya maksimum yang dapat dicapai oleh suatu turbin angin adalah 59.26 %. Hal ini didapatkan dari teori momentum elementer Betz yang

menjelaskan tentang bagaimana energi angin dapat dikonversikan menjadi bentuk energi lainnya.

Koefisien daya adalah perbandingan antara nilai energi mekanik yang dihasilkan dari perputaran rotor dan energi mekanik dari angin yang melintasi rotor. Keluaran energi mekanik dari rotor merupakan daya yang bervariasi torsi dan kecepatan putar dari rotor. Dalam persamaan matematis ditulis sebagai

$$P = T \frac{U_{tmax}}{r} = T\omega$$

Sementara Koefisien daya, dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$C_{power} = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = C_T \lambda$$

di mana,

$P$  = daya yang dapat diekstrak (Watt)

$T$  = torsi turbin angin Darrieus (N.m)

$\omega$  = putaran turbin angin Darrieus (rad/s)

$\rho$  = massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ ) =  $1.18415 \text{ kg/m}^3$

$A$  = luas penampang turbin ( $\text{m}^2$ ) = Diameter turbin (m) x tinggi turbin (m) =  $0.05054 \text{ m}^2$

$v$  = kecepatan angin *freestream* (m/s)

$C_T$  = koefisien torsi

$\lambda$  = *tip speed ratio* (TSR)

### 2.2.6. Tip Speed Ratio

*Tip speed ratio* merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan suatu turbin angin. *Tip speed ratio* (TSR) dilambangkan sebagai  $\lambda$  merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial maksimum dari turbin dengan kecepatan *free stream* yang melintasi turbin. sehingga secara matematis dapat dinyatakan sebagai

$$\lambda = TSR = \frac{U_{tmax}}{v} = \frac{\omega R}{v}$$

dimana :

- $\lambda$  = *Tip speed ratio*
- $U_{tmax}$  = kecepatan tangensial maksimum turbin (m/s)
- $\omega$  = kecepatan putar turbin (rad/s)
- $R$  = Radius rotor terluar
- $v$  = kecepatan angin *free stream*

Dengan mengetahui *Tip speed ratio*, maka dapat diketahui performa dari suatu turbin angin. Performa tersebut menyangkut seberapa besar torsi hasilan dari turbin dapat bekerja untuk kecepatan angin tertentu. Karakteristik dari masing-masing turbin tentunya berbeda-beda. Beberapa turbin mampu bekerja pada *tip speed ratio* yang rendah, ada pula yang baru dapat bekerja pada *tip speed ratio* yang tinggi. Selain itu suatu jenis turbin angin, tidak serta merta dapat bekerja maksimal pada setiap *tip speed ratio*. Pada satu titik *tip speed ratio* tertentu, suatu turbin dapat mengekstraksi energi secara maksimal ada juga ekstraksi rendah dan ada saat dimana ekstraksi energi tidak dapat dilakukan sama sekali.

### 2.2.7. *Solidity*

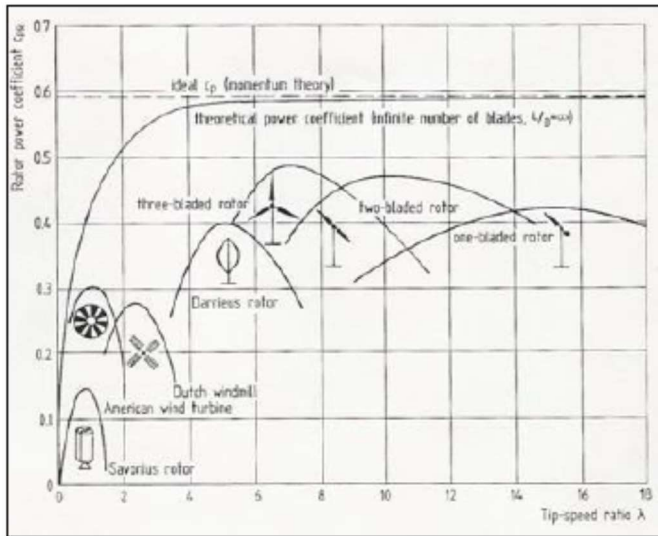
*Solidity* merupakan tingkat kerapatan turbin dari struktur geometri turbin Darrieus. Perhitungan angka *solidity* dari turbin dapat dihitung menggunakan persamaan. Umumnya, *solidity*, akan mempengaruhi nilai maksimum dan minimum torsi yang dihasilkan.

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{R}$$

Dimana :

- $N$  = Jumlah sudu Darrieus
- $c$  = Panjang *chord* sudu Darrieus

R = Jari – jari turbin Darrieus



Gambar 2.28 Grafik koefisien daya terhadap *tip speed ratio* untuk berbagai macam turbin angin (Bashar et. al. 2014)

### 2.2.8. Aspect Ratio

*Aspect ratio* adalah perbandingan antara tinggi dari rotor turbin dan jarak pusat turbin terhadap jarak terluar sudu rotor. Untuk turbin Darrieus hal ini sangat mempengaruhi tingkat keefektifan rotor dalam mengekstraksi energi kinetik yang dimiliki oleh aliran angin yang melintas. Dalam penelitian ini, digunakan persamaan berikut untuk merepresentasikan *aspect ratio*.

$$\text{Aspect Ratio} = AR = \frac{\text{Jari - jari}}{\text{Tinggi}} = \frac{R}{H}$$

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Variasi dan Domain Simulasi

#### 3.1.1. Variasi

Dengan mempertimbangkan tinjauan pustaka serta tujuan dari penelitian ini, maka dilakukan simulasi numerik menggunakan bantuan perangkat lunak STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Model yang dibuat pada penelitian ini berupa geometri tiga dimensi dari turbin angin bersumbu vertikal *hybrid* dimana tipe rotor merupakan gabungan antara rotor jenis Darrieus dan Savonius dengan beberapa modifikasi berupa *endplate* pada bagian atas dan bawah rotor Savonius. Parameter yang ditentukan untuk dilakukan variasi adalah jumlah *stage* dari rotor Darrieus dan kecepatan angin. Parameter dan variasi ditunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter penelitian

Parameter	Keterangan		
Jumlah Stage Darrieus	<i>Single stage</i> dan <i>Dual stage</i>		
Panjang <i>chord</i>	1 cm ( $\sigma = 0.26$ ) dan 2 cm ( $\sigma = 0.52$ )		
Pengambilan putaran	Setiap $5^0$ atau 72 fps		
Kecepatan angin (m/s)	5	10	15
Kecepatan sudut turbin (rpm)	440	950	1500
Reynolds Number (Re) rotor Darrieus dengan chord 1 cm	$3,19 \times 10^6$	$6.38 \times 10^6$	$9.57 \times 10^6$
Reynold Number (Re) rotor Darrieus dengan chord 2 cm	$6.38 \times 10^6$	$1.28 \times 10^7$	$1.91 \times 10^7$

Data yang digunakan untuk putaran turbin diadaptasi dari eksperimen yang telah dilakukan oleh Dwiyanoro et. al. (2015) dengan mengasumsikan putaran yang sama pada kecepatan 9 m/s. Kemudian data ini diekstrapolasi untuk mendapatkan data kecepatan sudut turbin pada kecepatan angin yang sesuai.

### 3.1.2. *Domain Simulasi*

Pada penelitian ini terdapat dua *domain section*, yaitu domain berputar (*rotating domain*) dan domain yang tetap (*static domain*). *Domain* yang berputar terletak disekitar model turbin dan berbentuk silinder. Tujuannya, *domain* ini dapat dijadikan bagian dari *rotating motion* sehingga dapat meneliti aliran udara yang berada disekitar turbin yang berputar pada *time step* tertentu. Selanjutnya *domain* tetap adalah *domain* terluar yang dilintasi oleh fluida. *Domain* ini tidak bergerak dan berbentuk balok.

## 3.2. *Tahap Pre Processing*

### 3.2.1. *Pembuatan Geometri dan Meshing*

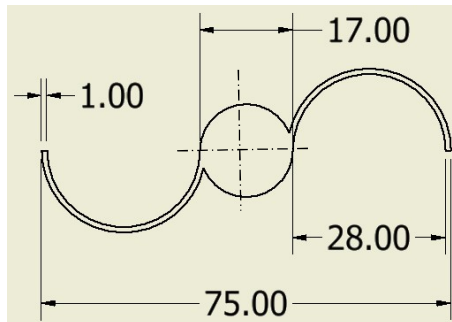
Dalam tahap ini, dibuat model dari turbin angin sumbu vertikal yang akan dipakai dalam perhitungan numerik. Pembuatan geometri ini juga menyangkut pembuatan *domain* disekitar model yang akan dipakai. Gambar model turbin angin sumbu vertikal yang dipakai pada penelitian ini terdapat pada gambar 3.1 dan gambar 3.2 . Diameter rotor Darrieus (  $D = 234 \text{ mm}$  ) menjadi acuan pada pembuatan geometri.

Pada masing-masing variasi, terdapat *endplate* tambahan pada bagian rotor Darrieus dengan. Ukurannya adalah  $1.14 \times$  panjang chord. Panjang Chord dari airfoil rotor Darrieus yang dipakai adalah 10 mm dan profilnya mengikuti profil airfoil NACA 0024. Sementara itu pada rotor Savonius terdapat juga *endplate* dengan diameter endplate sebesar 82.5 mm

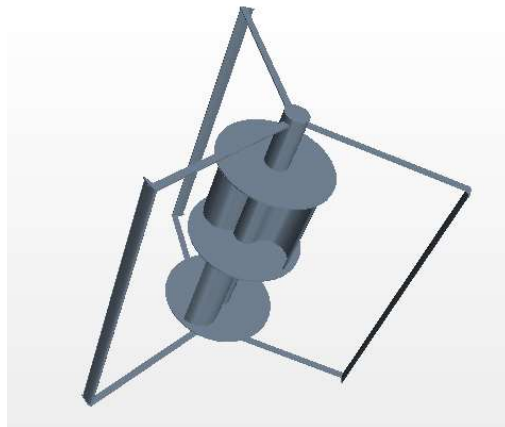
Letak masing-masing sudu pada rotor Darrieus terpisah sebesar  $120^\circ$  untuk masing-masing variasi. Sementara itu rotor



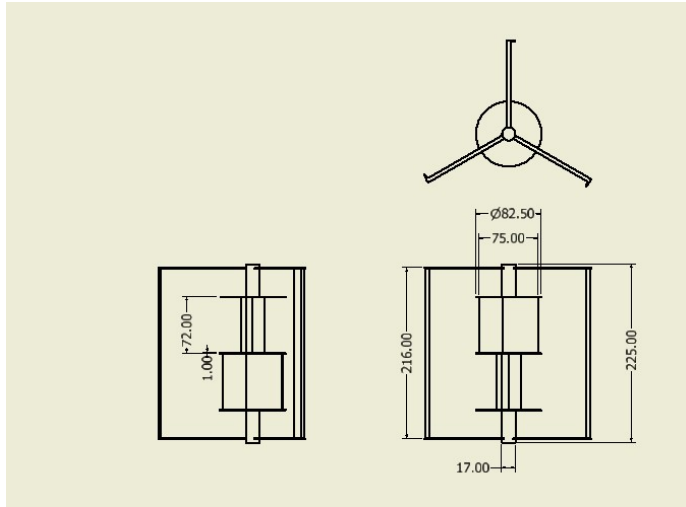
Savonius memiliki jumlah sudu sebesar 2 dan pada *stage* bagian atas dan bagian bawah bentuk sudu ini berbeda sebesar  $90^\circ$ . Untuk variasi *dual stage* yang ada pada rotor Darrieus, rotor pada *stage* atas dan bagian bawah berbeda sebesar  $60^\circ$ . Selain itu tebal daripada setiap *endplate* dan penyangga adalah sebesar 1 mm sehingga dapat diabaikan.



Gambar 3. 1 Dimensi rotor Savonius yang digunakan

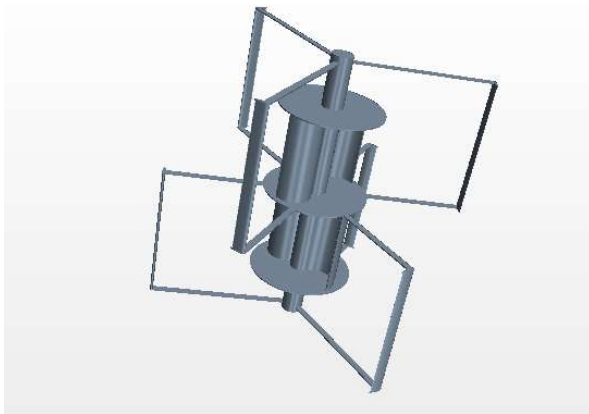


( a )

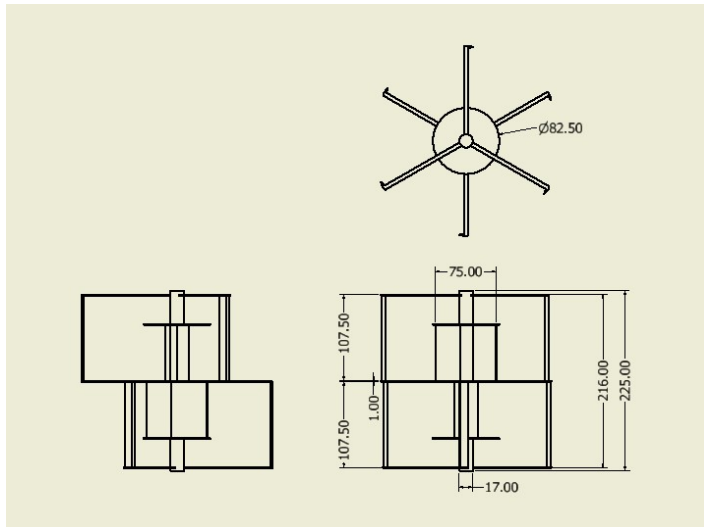


( b )

Gambar 3. 2 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage ( a ) gambar isometris ( b ) dimensi

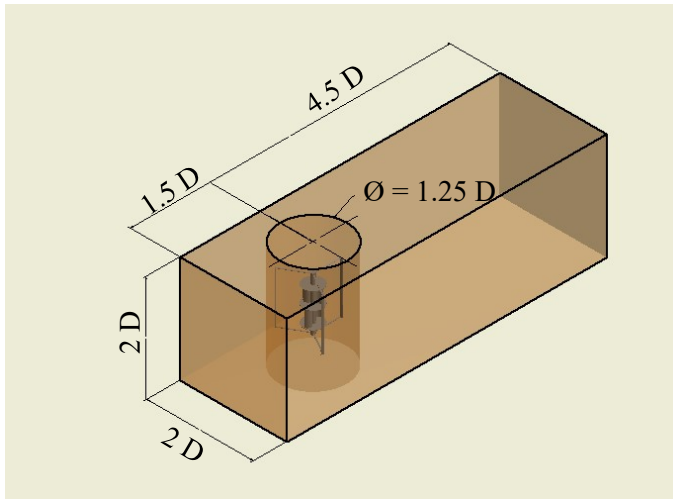


( a )

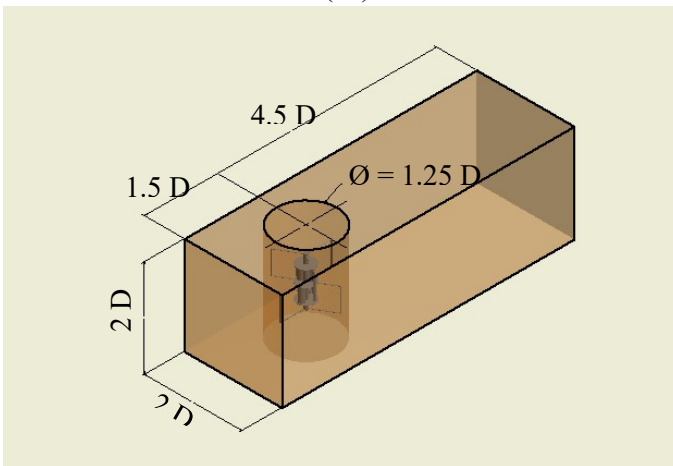


( b )

Gambar 3. 3 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage ( a ) gambar isometris ( b ) dimensi



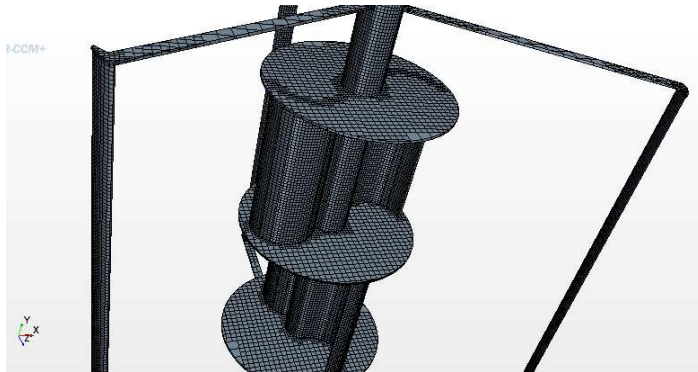
(a)



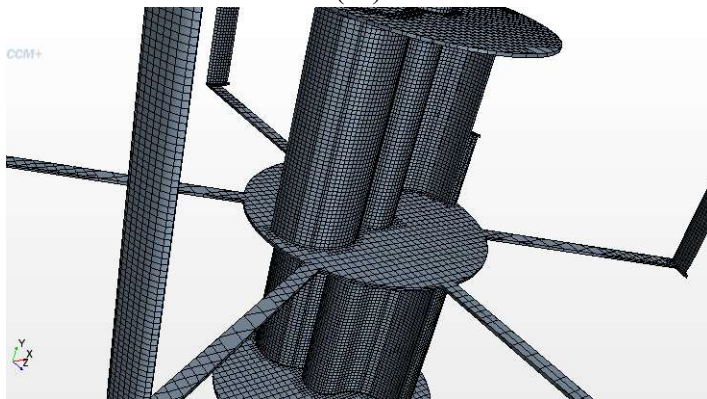
(b)

Gambar 3. 4 geometri hitung dari perhitungan turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus ( a ) Single Stage ( b ) Dual stage

Dalam pembuatan meshing, geometri yang telah dibuat dibagi menjadi kontrol volume kecil – kecil (*finite volume*) . Volume kecil-kecil tersebut adalah yang digunakan untuk perhitungan. pemilihan *mesh* dioperasikan secara *automated* dengan opsi tipe *trimmed cell*

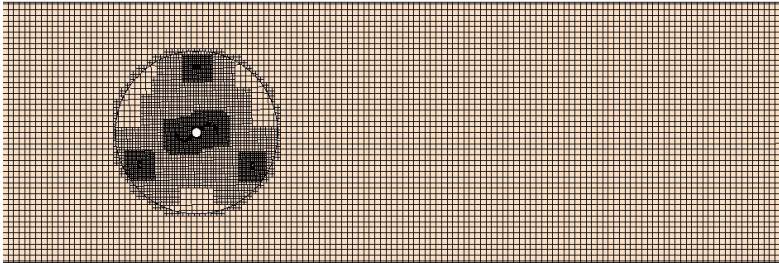


( a )



( b )

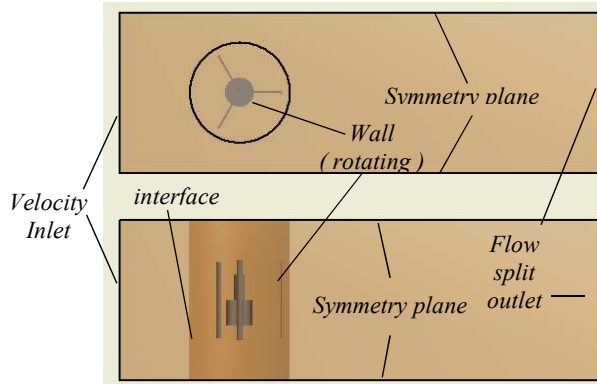
Gambar 3. 5 surface mesh disekitar model turbin angin Darrieus - Savonius dari permodelan ( a ) single stage ,  
( b ) dual stage



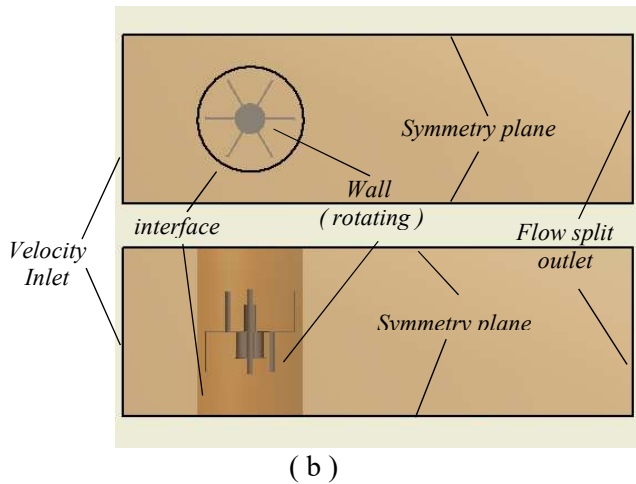
Gambar 3. 6 meshing pada turbin model single stage pada plane perpotongan tengah,

### 3.2.2. *Boundary Condition*

Kondisi batas pada aliran yang akan melewati benda uji ditetapkan pada bagian *inlet*, *outlet*, dan *interface*-nya. *interface* adalah batasan berupa *wall* yang diatur agar dapat ditembus oleh aliran. pada kasus ini, batasan *interface* digunakan pada pembatas antar *domain*. Yaitu, antara *domain* yang berputar dan *domain* yang statis. *Boundary condition* pada *inlet* adalah *velocity inlet* yang bervariasi nilainya pada 5, 10, dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* digunakan *flow-split outlet*. Pada benda uji digunakan *wall* dengan tambahan *rotation motion* seperti ditunjukkan pada gambar 3.7



( a )



*Gambar 3.7 Boundary conditions yang dipakai pada perhitungan numerik ( a ) single stage, ( b ) dual stage*

### 3.2.3. Parameter Permodelan

#### 3.2.3.1. Models

Model perhitungan aliran yang digunakan pada penelitian ini adalah *segregated flow* dengan *turbulence model* k-epsilon *realizable*. Parameter lain yang perlu diperhatikan adalah penggunaan parameter *implicit unsteady* dengan skema diskretisasi *second order upwind*. Selain itu, Diskretisasi *time step* yang digunakan adalah *second order*.

#### 3.2.3.2. Materials

Permodelan ini menggunakan udara sebagai fluida kerja Dimana *properties* yang digunakan adalah *default* dengan *density* udara sebesar  $1.18415 \text{ kg/m}^3$  (*constant*) dan *dynamic viscosity* sebesar  $1.85508 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$  (*constant*).

#### 3.2.3.3. Rotation Motion & Rotating Reference Frame

Turbin diputar dengan mengaplikasikan fitur *rotation motion*. Kemudian, ditentukan sumbu putar, sumbu *origin* pada sumbu turbin dan kecepatan putaran pada *body* yang akan diputar sesuai dengan data yang telah disediakan.

### 3.3. Tahap *Processing*

Tahap processing adalah tahap pencarian data-data numerik. Parameter-parameter yang telah ditentukan pada saat tahap *pre processing* akan dihitung dan dilakukan beberapa kali iterasi hingga mencapai suatu kriteria konvergensi pada nilai residual  $10^{-5}$ . Hal ini berlaku untuk semua parameter residual kecuali *continuity* dapat dianggap konvergen ketika residual telah mencapai  $10^{-3}$ . Jika kriteria konvergensi tidak tercapai maka dapat dilakukan kembali pembuatan meshing yang lebih baik. Selain, itu konfigurasi *turbulence intensity* beserta *turbulence length* diatur agar mempermudah terjadinya konvergensi. Jika hasil konvergensi telah tercapai maka hasil dari perhitungan telah dapat diterima dan dapat dilanjutkan pada tahap *post processing*

### 3.4. Tahap *Post Processing*

Pada tahap ini , solusi numerik yang telah didapatkan pada tahap *processing* akan diolah datanya. Pengolahan data ini adalah berupa pengolahan nilai-nilai solusi dari tahap *processing* ke dalam bentuk grafik yaitu kurva nilai koefisien torsi dan daya. Selain itu dapat juga ditampilkan visualisasi kontur aliran yang terjadi disekitar sudu turbin agar dapat dipastikan pola aliran yang bagaimana yang dapat mempengaruhi performa dari model turbin hasil dari perhitungan numerik yang telah dilakukan.

### 3.5. Contoh Perhitungan

#### 3.5.1. Perhitungan TSR

$$\lambda = \frac{U_{max}}{v} = \frac{\omega R}{v}$$



Misalkan diambil pada kecepatan angin  $v = 10$  m/s, maka kecepatan sudut turbin adalah  $\omega = 950$  rpm / 99.43 rad/s . Sementara radius turbin adalah tetap yaitu  $R = 0.117$ m. Maka perhitungan menjadi berikut:

$$\lambda = \frac{99.43 \times 0.117}{10} = 1.16$$

### 3.5.2. Perhitungan *Solidity*

$$\sigma = \frac{Nc}{B}$$

*Solidity* dari rotor Darrieus pada instalasi turbin angin ini. Dapat dihitung dengan persamaan diatas. Misalkan panjang *chord* sudu rotor Darrieus yang digunakan adalah 1 cm, maka perhitungan menjadi berikut

$$\sigma = \frac{Nc}{R} = \frac{3 \times 1}{0.117} = 0.26$$

### 3.5.3. Perhitungan *Time step*

Untuk merekam fenomena aliran yang terjadi tiap 5 derajatnya, maka diperlukan lah perhitungan *time step* dalam analisis aliran *unsteady* ini. contoh perhitungan berikut digunakan untuk merekam aliran tiap 5° pada kecepatan 10 m/s.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{\text{waktu per putaran}}$$

$$99.43 \text{ rad/s} = \frac{2\pi - 0}{\text{waktu per putaran}}$$

$$\text{Waktu per putaran} = \frac{2\pi - 0}{99.43 \text{ rad/s}} = 0,0632 \text{ s}$$

$$\text{time step} = \frac{\text{waktu per putaran}}{\text{jumlah frame}} = \frac{0,0632 \text{ s}}{72} = 0,00088 \text{ s}$$

di mana:

$\Theta$  = sudut satu putaran

$\Theta_0$  = sudut nol putaran

### 3.5.4. Perhitungan Koefisien daya

$$C_{power} = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = C_T \lambda$$

Misalkan akan dihitung kecepatan daya pada kecepatan angin 10 m/s dengan variasi panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm, maka perhitungan menjadi sebagai berikut

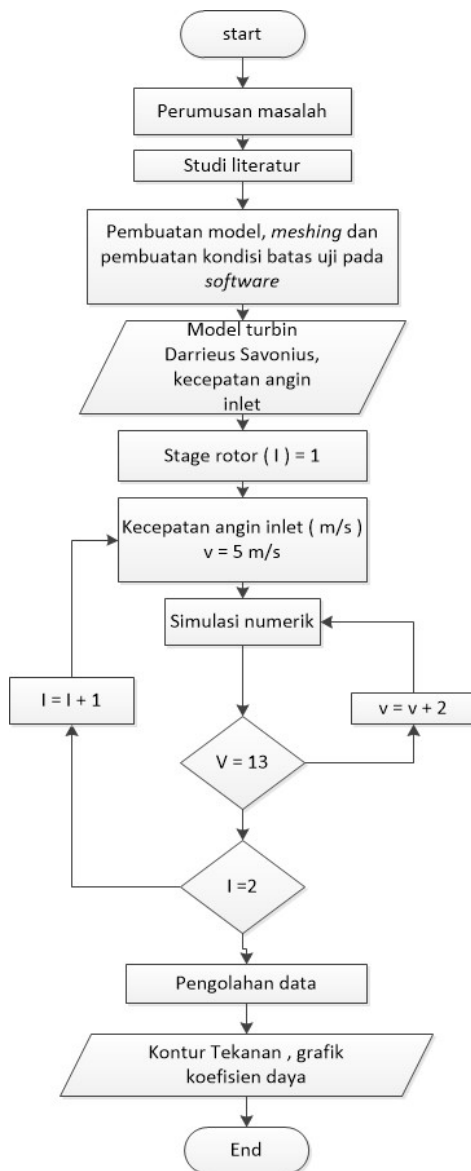
$$C_P = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$$

$$C_P = \frac{0.00145 \times 99.43}{\frac{1}{2} \times 1.18415 \times 0.05054 \times 10^3}$$

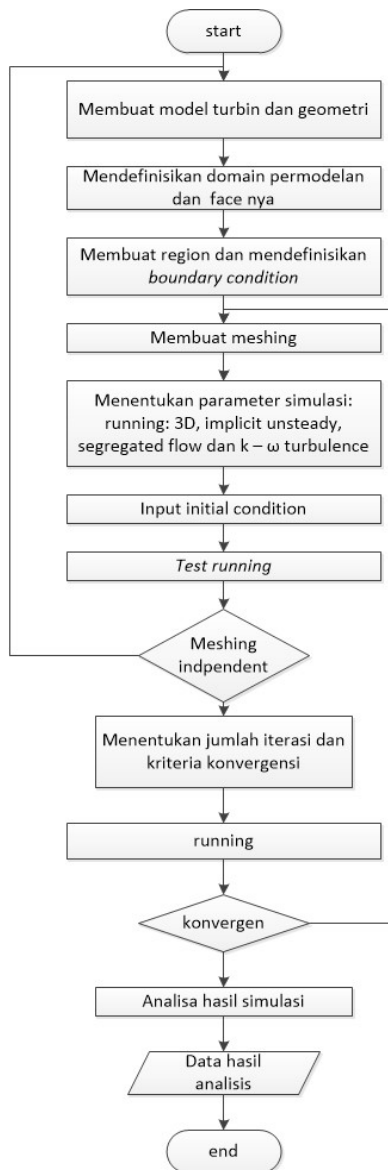
$$C_P = 0.00465$$

### 3.6. Diagram Alir ( *Flowchart* )

Pada penelitian ini diagram alir yang digunakan untuk simulasi numerik adalah sebagai berikut :



Gambar 3.8 Diagram alir penelitian secara umum



Gambar 3.9 diagram alir penelitian numerik

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Putaran turbin dan *tip speed ratio*

Dengan mempertimbangkan data yang telah diperoleh melalui tinjauan pustaka yang telah dilakukan, maka digunakan data putaran dan *tip speed ratio* sesuai tabel 4.1 berikut digunakan sebagai variasi dalam perhitungan numerik penelitian ini. Data tersebut merupakan adaptasi dari penelitian yang telah dilakukan Dwiyantoro et al ( 2015 ) yang melakukan eksperimen turbin angin vertikal dengan model turbin angin *hybrid* yang dimensinya kurang lebih sama.

Tabel 4. 1 data kecepatan sudut turbin dan *tip speed ratio*  
untuk setiap kecepatan inlet

Kecepatan inlet (m/s)	Kecepatan sudut (rpm)	<i>Tip Speed Ratio</i>
5	440	1.08
10	950	1.16
15	1500	1.22

### 4.2. *Time Step*

Fenomena dari aliran yang melintasi turbin angin nantinya akan direkam pada posisi sudut setiap 5°. Untuk itu, diperlukan perhitungan *time step* sehingga setiap *step*nya dapat merekam fenomena aliran pada posisi sudut tiap 5°. Data lengkap untuk kecepatan inlet angin lainnya dapat dilihat pada tabel 4.2

Tabel 4.2 Time step untuk tiap kecepatan angin

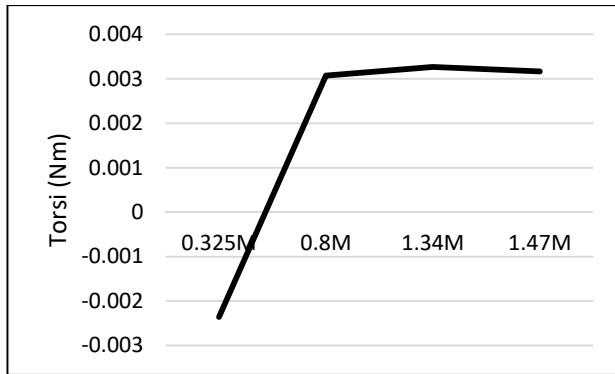
$v$ (m/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	Jumlah <i>Frame</i>	Waktu Per Putaran (s)	<i>Time</i> <i>Step</i>
5	440	46.07	72	0,13631	0,00189
10	950	99.43		0.06316	0,00088
15	1500	157		0,04	0,00056

#### 4.3. *Grid Independence*

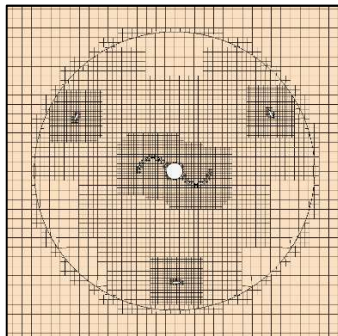
Uji *Grid Independency* diperlukan untuk meninjau seberapa baik mesh yang dipakai dalam menangkap informasi aliran yang akan diproses. *Grid independency* yang dilakukan menggunakan nilai rata-rata torsi yang dihasilkan turbin secara keseluruhan setelah turbin mencapai putaran *steady*, yaitu pada putaran dimana nilai karakteristiknya tidak berubah lagi tiap putarannya. Hasil uji *grid independency* pada beberapa jenis mesh dengan jumlah *cells* yang berbeda pada kecepatan 10m/s ditunjukkan pada tabel 4.3 dan gambar 4.1.

Tabel 4.3 Hasil uji grid independency

Tipe mesh	Jumlah <i>cells</i>	Nilai torsi
A	325000	-0.00236 Nm
B	800000	0.003076 Nm
C	1340000	0.003272 Nm
D	1470000	0.003171 Nm



Gambar 4.1 Grafik torsi yang mampu direkam masing-masing jenis mesh pada putaran steady

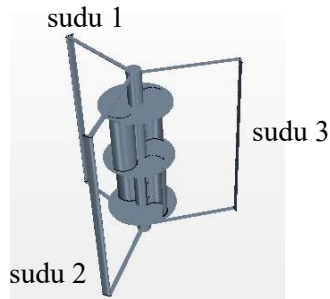


Gambar 4.2 mesh tipe B dengan jumlah cells sebesar 800000

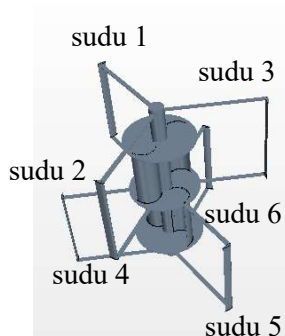
Dari grafik yang telah ditunjukkan pada gambar 4.1, maka dapat disimpulkan bahwa jenis *mesh* dengan jumlah 800000 *cells* dapat dinilai telah mampu menangkap fenomena karakteristik aliran yang terjadi disekitar turbin. Hal ini terlihat dari fluktuasi grafik torsi *mesh* dengan jumlah diatas 800000 *cells* relatif konstan. Berbeda halnya dengan nilai torsi pada *mesh* dengan jumlah 325000 *cells* yang nilainya negatif.

#### 4.4. Penamaan – penamaan pada analisis

Untuk mempermudah analisis pada turbin angin Darrieus – Savonius, maka digunakan skema seperti gambar 4.3 dan gambar 4.4 sebagai acuan putaran sudut turbin ( $\theta$ ) dan nama dari sudu – sudu Darrieus dari turbin Darrieus – Savonius.

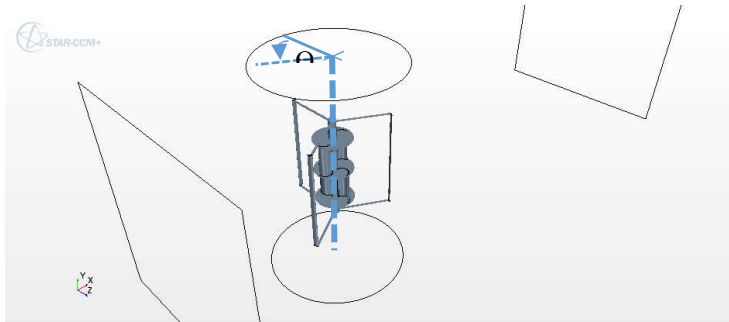


Gambar 4.3 Penamaan sudu darrieus untuk turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus Single Stage

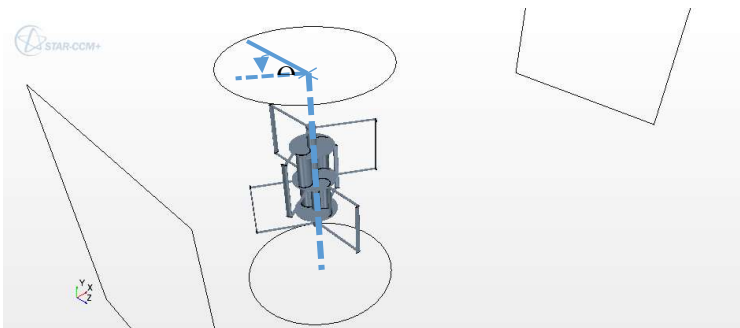


Gambar 4.4 Penamaan sudu Darrieus untuk turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage



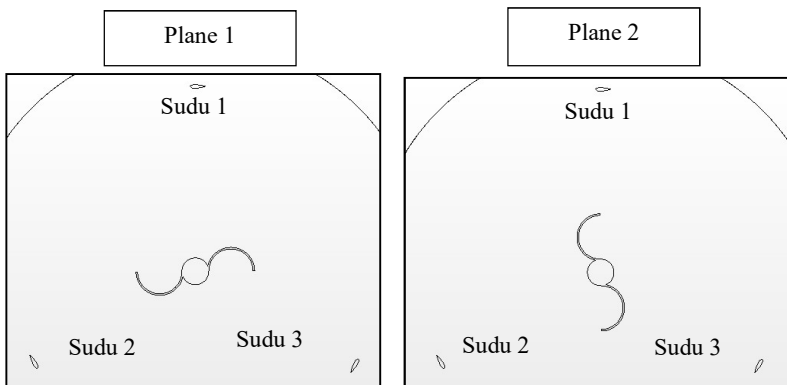
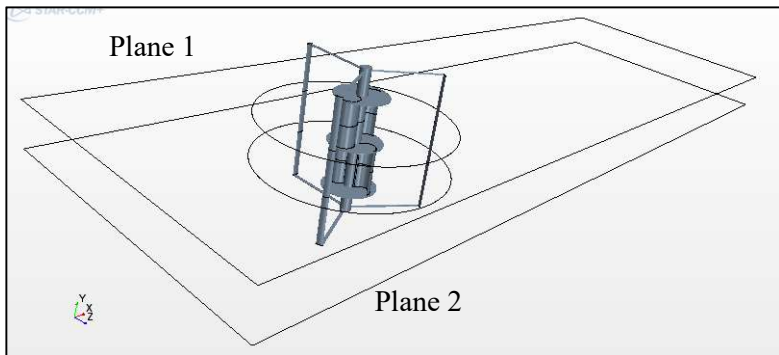


Gambar 4.5 Skema putaran sudut untuk instalasi analisis numerik turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage

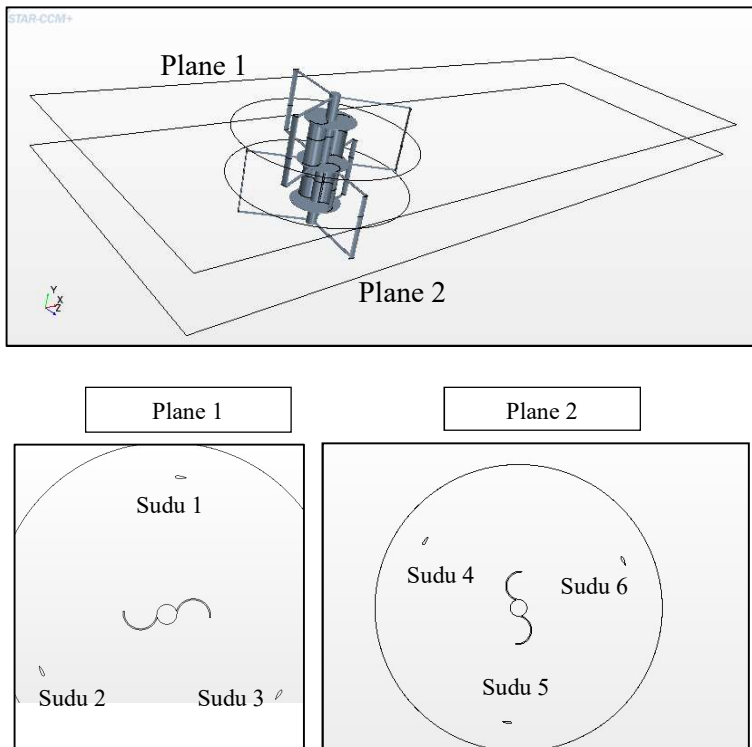


Gambar 4. 6 Skema putaran sudut untuk instalasi analisis numerik turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus dual stage

Selain itu untuk mempermudah analisis kontur terhadap efek 3D dari instalasi, maka dibentuk 2 buah bidang planar yang membelah diantara domain statis instalasi, Skema dari bidang planar tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7 dan 4.8.



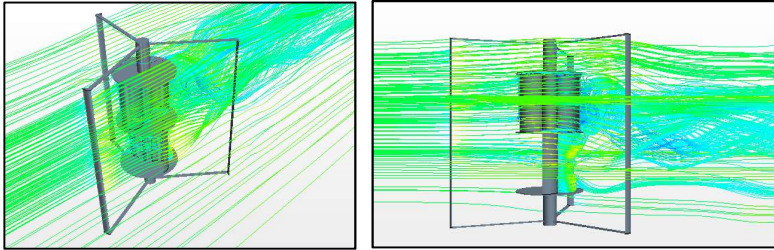
Gambar 4. 7 Skema letak bidang planar analisis kontur untuk instalasi turbin angin single stage pada posisi  $\Theta = 0^\circ$



Gambar 4. 8 Skema letak bidang planar analisis kontur untuk instalasi turbin angin dual stage pada posisi  $\Theta = 0$  derajat

#### 4.5. Analisis Turbin Angin Darreus – Savonius dengan panjang *chord* sudu rotor Darrieus 1 cm

##### 4.5.1. Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus single stage



Gambar 4.9 *streamline* aliran angin yang melewati turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* pada kecepatan 10m/s pada  $\Theta = 0^0$ ,  $Re = 6.38 \times 10^6$

Pada gambar 4.9 diatas, dapat dilihat *streamline* aliran yang melewati instalasi turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage*. Pada gambar diatas dapat dilihat interaksi pada rotor Savonius pada bagian bawah tidak mempengaruhi ekstraksi energi yang dilakukan oleh rotor Savonius bagian atas, demikian juga sebaliknya. Akan tetapi, setelah aliran angin melewati rotor Savonius, pada bagian *downstream*nya akan timbul aliran angin yang berputar yaitu aliran *vortex* yang dinamakan daerah *wake*. Akibat adanya daerah *wake* ini, ketika sudu Darrieus berputar dan melintasi daerah ini, sudu tersebut tidak dapat melakukan ekstraksi secara optimal. Hal ini dikarenakan daerah disekitaran wake ini memiliki tekanan yang rendah dapat *streamline* aliran yang tidak menentu.

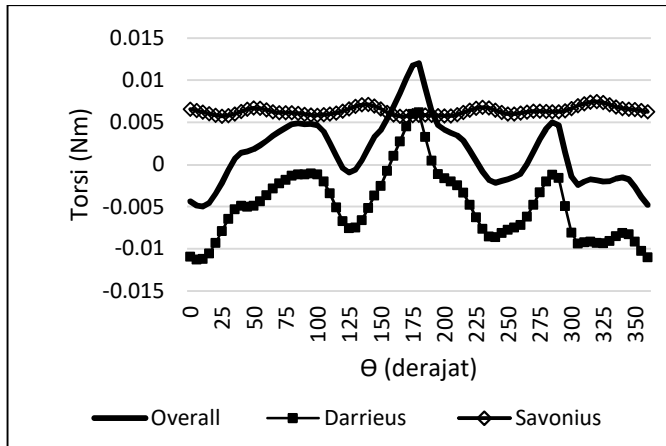
Gambar 4.10 berikut menunjukkan tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage*. Rotor Darrieus pada sebagian besar posisi sudut putar menghasilkan torsi yang negatif. Artinya, dengan menggunakan panjang *chord* 1 cm, rotor Darrieus belum mampu menghasilkan daya secara optimal pada kecepatan angin 10 m/s. Disisi lain rotor

Savonius telah bekerja optimal dan menciptakan torsi rata-rata 0.006 Nm. Dengan bantuan rotor Savonius, Torsi yang dihasilkan Darrieus dapat terangkat nilainya sehingga dalam satu putaran dapat menghasilkan torsi rata – rata yang positif. Artinya, dalam instalasi ini, dengan kecepatan 10 m/s, rotor Darrieus merupakan beban dari turbin Darrieus – Savonius secara keseluruhan.

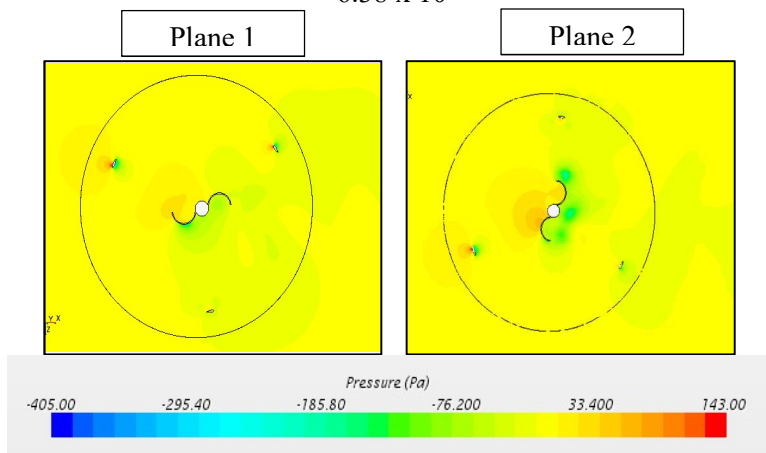
Rotor Darrieus yang memiliki tiga sudu, silih berganti berkontribusi dalam menghasilkan torsi. Pada posisi  $\Theta = 180^\circ$ , rotor Darrieus mencapai titik maksimum untuk mengekstraksi energi. Posisi sudu Darrieus yang menghadap 30 derajat dengan arah datangnya angin merupakan posisi yang paling baik bagi suatu sudu Darrieus. Hal ini dapat dilihat pada gambar kontur pada gambar 4.11, dimana pada posisi  $\Theta = 175^\circ$ , sudu Darrieus 3 yang terpisah 120 derajat dengan posisi sudu 1, memberikan kontribusi torsi yang terbesar. Hal ini dapat dilihat pada perbedaan daerah luasan tekanan pada kontur tekanan disekitar sudu Darrieus 3. Pada dua posisi puncak Darrieus lain yaitu posisi sudut  $\Theta = 60^\circ$  dan  $\Theta = 300^\circ$ . Nilai maksimum torsi dikontribusikan oleh sudu Darrieus 1 dan 2.

#### **4.5.1. Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage***

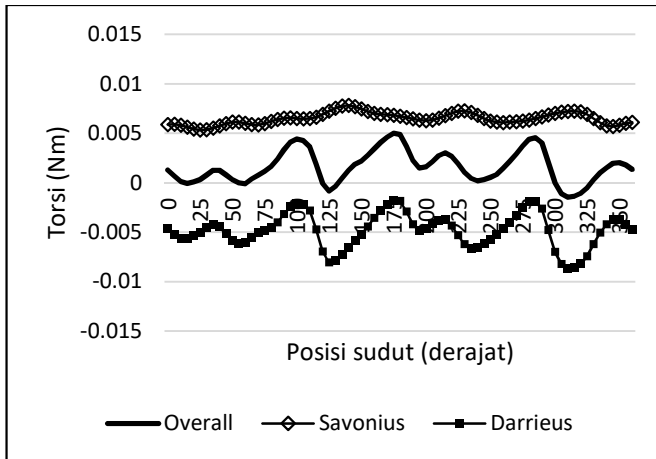
Rotor Darrieus *dual stage* pada instalasi turbin angin Darrieus – Savonius menghasilkan torsi yang fluktuasinya lebih sempit dibandingkan tipe *single stage*. Namun, fluktuasi yang terjadi lebih sering bila dibandingkan dengan turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage*. Sama halnya pada turbin angin Darrieus – Savonius dengan tipe rotor Darrieus *single stage*, rotor Darrieus menciptakan torsi yang negatif dalam satu periode putaran turbin. Sementara itu, rotor Savonius memiliki nilai torsi yang relatif konstan mengangkat nilai torsi Darrieus, sehingga nilai torsi keseluruhan turbin menjadi positif.



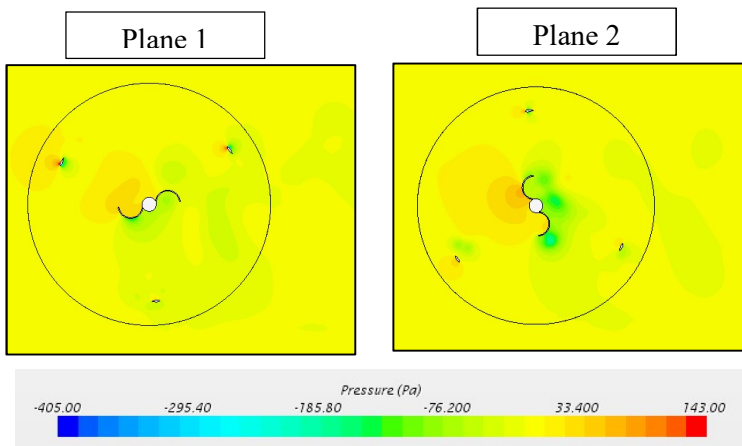
Gambar 4.10 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10 m/s,  $Re = 6.38 \times 10^6$



Gambar 4.11 Kontur tekanan yang dihasilkan turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* dengan anjang *chord* sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10m/s pada putaran sudut  $\Theta = 180^\circ$ ,  $Re = 6.38 \times 10^6$



Gambar 4.12 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10 m/s,  $Re = 6.38 \times 10^6$



Gambar 4.13 Kontur tekanan pada turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan 10 m/s pada posisi  $\Theta = 180^\circ$ ,  $Re = 6.38 \times 10^6$

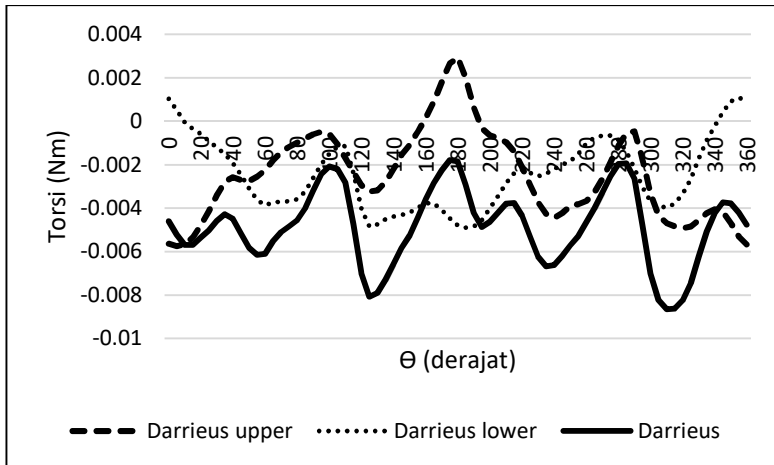
Puncak – puncak torsi dari turbin dengan rotor Darrieus dual stage yang terlihat pada gambar 4.12, berselisih sekitar  $60^\circ$  tiap puncaknya. Hal ini dikarenakan tiap sudu Darrieus berselisih  $30^\circ$  antar sudunya. Pada gambar kontur 4.13 dapat dilihat pada posisi  $\Theta = 180^\circ$  sudu 3 pada rotor bagian atas dan sudu 5 pada rotor bagian bawah adalah 2 sudu yang memberikan torsi pada posisi putar  $180^\circ$  derajat. Hal ini dapat dilihat dari perbedaan kontur tekanan disekitar sudu tersebut yang menandakan terciptanya gaya angkat pada kedua sudu tersebut. Selain itu dapat dilihat pada gambar 4.14 nilai torsi yang dihasilkan pada sudut putar  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ , dan  $240^\circ$  adalah nilai minimumnya. hal ini dikarenakan pada ketiga posisi ini, sudu Darrieus yang menciptakan torsi hanya satu bilah saja. sementara posisi sudut lain terdapat 2 bilah sudu yang menciptakan torsi. Pada gambar 4.14, dapat dilihat pada trendline Darrieus upper maupun lower, terdapat tiga buah puncak yang menandakan torsi maksimal yang mampu di kontribusikan oleh masing – masing sudu pada rotor tersebut.

Pada gambar 4.15 dapat dilihat bagaimana streamline aliran angin ketika melewati instalasi turbin angin ini. Hasilnya memperlihatkan bahwa aliran angin yang melewati sudu turbin Darrieus bagian rotor bawah, tidak mempengaruhi sudu Darrieus di rotor bagian atasnya. Hal ini dikarenakan sudu Darrieus yang bentuknya sangat tipis sehingga mudah dilalui oleh aliran dan menciptakan kecil sekali daerah *wake* ketika sudu ini bergerak. Sementara itu, rotor Savonius masih berkontribusi menciptakan daerah *wake* dibagian *downstream* turbin yang mengurangi kemampuan sudu Darrieus ketika berada di daerah ini untuk melakukan ekstraksi energi.

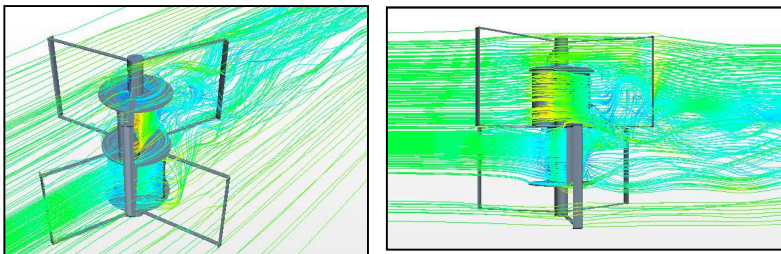
#### **4.5.2. Analisis Perbandingan Torsi dan koefisien daya**

Dari kedua jenis turbin dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm ini sebenarnya hampir tidak memiliki perbedaan dalam menghasilkan torsi. Hal ini dikarenakan sebagian besar torsi yang dihasilkan dari turbin secara keseluruhan dipengaruhi oleh rotor Savoniusnya. Hal ini juga berlaku



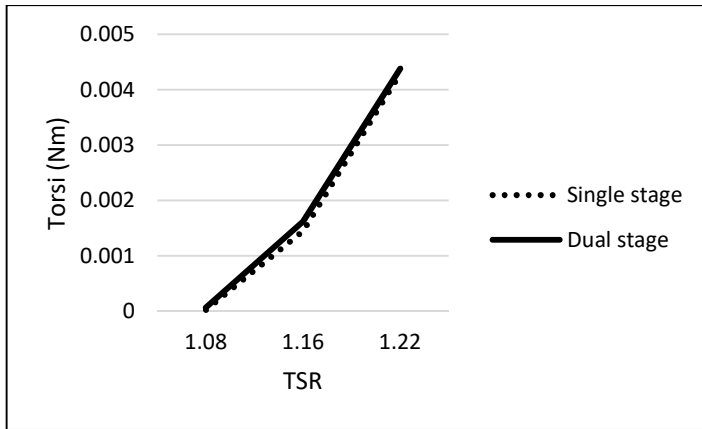


Gambar 4.14 Grafik Torsi yang dihasilkan pada rotor Darrieus turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* dengan panjang *chord* Darrieus 1 cm pada kecepatan angin 10 m/s,  $Re = 6.38 \times 10^6$

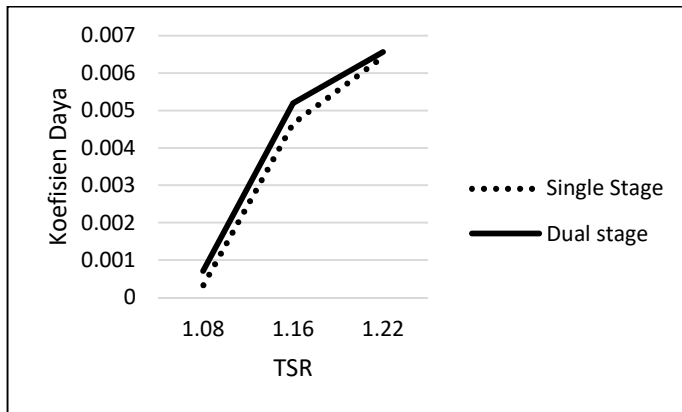


Gambar 4.15 *Streamline* aliran melewati instalasi turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm pada kecepatan angin 10m/s,  $Re = 6.38 \times 10^6$

untuk koefisien daya yang dihasilkan seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.16 dan 4.17. Dari kedua grafik didapatkan nilai torsi dan koefisien daya dengan *dual stage* memiliki nilai yang lebih tinggi.



Gambar 4.16 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm terhadap TSR,

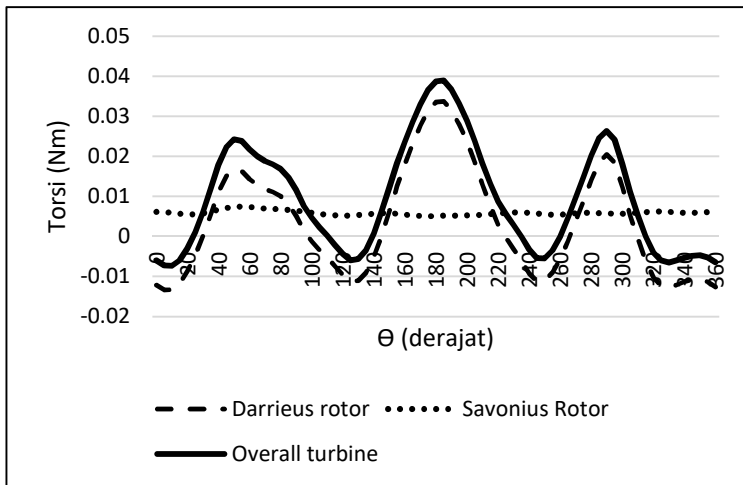


Gambar 4.17 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm terhadap TSR

#### 4.6. Analisis Turbin Angin Darreus – Savonius dengan panjang *chord* sudu rotor Darrieus 2 cm

##### 4.6.1. Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage*.

Gambar 4.18 berikut menunjukkan tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage*. Rotor Darrieus yang memiliki tiga sudu, silih berganti berkontribusi dalam menghasilkan torsi maksimum setiap rentang  $120^\circ$  sama halnya seperti yang terjadi pada variasi panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm. Yang membedakan adalah kemampuan data yang dibaca oleh *software* meningkat dengan bertambahnya panjang *chord* sudu Darrieus. Hal ini dikarenakan, dengan panjang *chord* sudu Darrieus, sudu Darrieus jadi tidak mudah mengalami *stall* ketika terjadinya pergeseran *angle of attack* ketika sudu berputar. Sehingga, tidak banyak perubahan kecepatan relatif disekitar sudu Darrieus.



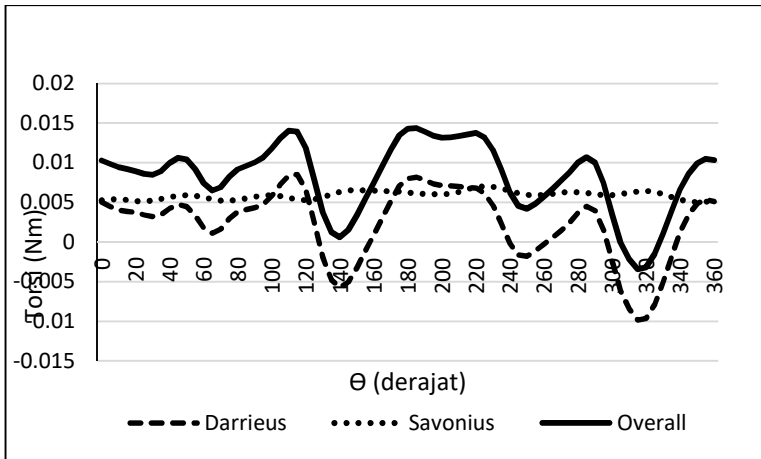
Gambar 4.18 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* dengan panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm pada kecepatan 10 m/s,  $Re = 1.28 \times 10^7$

Pada instalasi dengan panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm ini, rotor Savonius mengalami sedikit penurunan dalam torsi yang dihasilkan. Torsi yang dihasilkan rotor Savonius pada instalasi ini memiliki nilai rata – rata 0.05926 Nm untuk kecepatan 10m/s. Hal ini terjadi karena peningkatan panjang *chord* berdampak pada terhalangnya sebagian area di bagian *upstream* rotor Savonius. Nilai torsi maksimum yang mampu dicapai adalah 0.0039 Nm pada  $\Theta = 180^0$ .

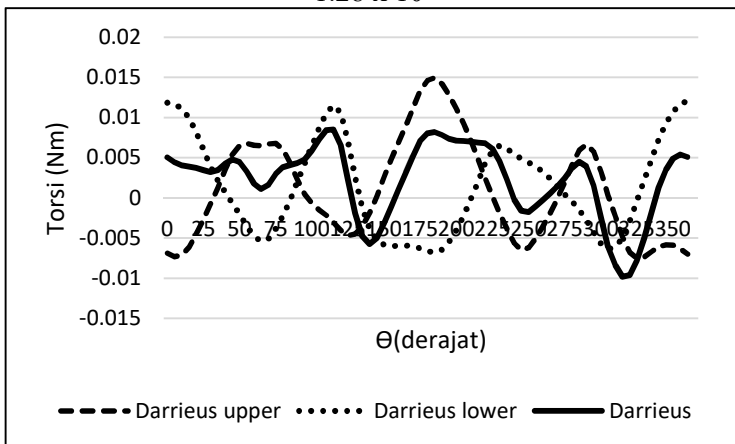
#### **4.6.2. Analisis Turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage***

Tren pada gambar 4.19 menunjukkan tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan panjang *chord* pada sudu Darrieus 2 cm pada kecepatan 10 m/s. Fluktuasi, nilai torsi yang dihasilkan pada turbin Darrieus – Savonius lebih kecil bila dibandingkan dengan tipe instalasi turbin dengan rotor Darrieus *single stage*. Torsi maksimum yang mampu dicapai turbin ini adalah 0.0143 pada  $\Theta = 180^0$ . Nilai ini lebih kecil 36% dibandingkan nilai torsi maksimum pada instalasi turbin dengan rotor Darrieus *singlestage*.

Pada gambar 4.20 dapat dilihat bagaimana kontribusi rotor atas dan bawah terhadap instalasi rotor Darrieus secara keseluruhan. Titik krusial dari instalasi ini ada pada sudut putar  $\Theta = 135^0$  dan  $315^0$ . Dimana pada sudut ini, torsi minimum dihasilkan oleh rotor bagian atas dan bawahnya. Hasilnya, titik minimum rotor Darrieus secara keseluruhan dicapai pada titik ini. Demikian juga untuk instalasi turbin secara keseluruhan.



Gambar 4.19 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* dengan panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm pada kecepatan 10 m/s,  $Re = 1.28 \times 10^7$

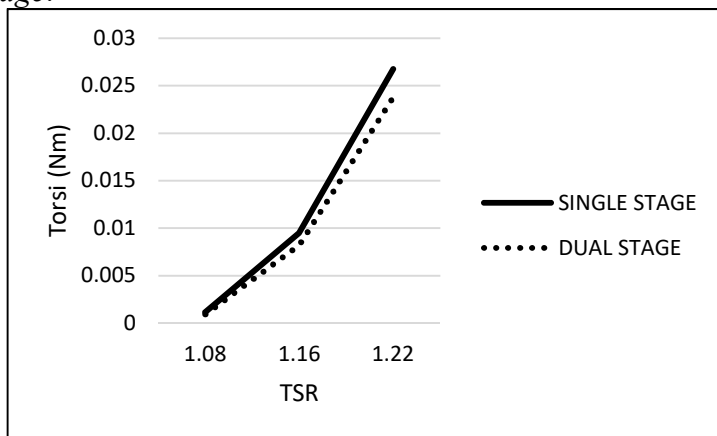


Gambar 4. 20 Grafik Torsi yang dihasilkan pada rotor Darrieus turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* dengan panjang *chord* Darrieus 2 cm pada kecepatan angin 10 m/s,  $Re = 1.28 \times 10^7$

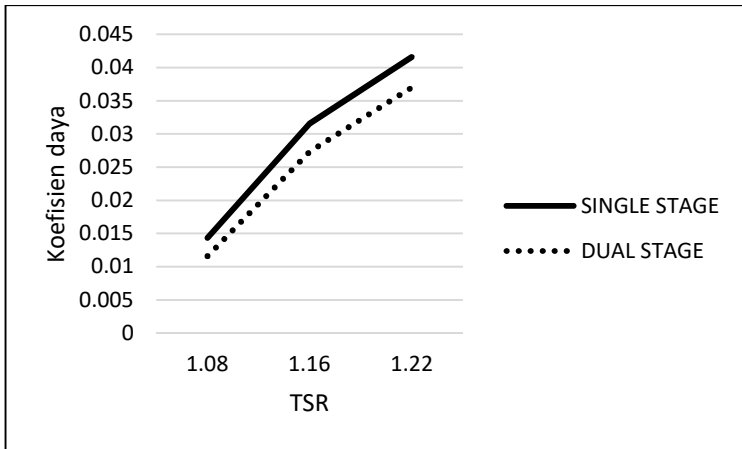
#### 4.6.3. Analisis Perbandingan Torsi dan koefisien daya

Torsi rata - rata yang dihasilkan pada variasi panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm dapat dilihat pada gambar 4.21. Tren dari torsi rata – rata – yang dihasilkan menunjukkan adanya peningkatan dengan bertambahnya TSR. Torsi yang dicapai oleh kedua jenis turbin relatif sama pada TSR 1.08 dan 1.16. Namun pada TSR 1.22, nilai dari torsi yang dihasilkan lebih tinggi dengan instalasi rotor Darrieus *single stage*. Dimana, nilai maksimum yang dicapai adalah 0.00267 Nm. Sementara nilai torsi maksimum yang dicapai oleh Darrieus *dual stage* adalah 0.002382 Nm.

Nilai koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan bertambahnya nilai torsi. Semakin tinggi TSR maka semakin besar pula nilai koefisien dayanya. Gambar 4.22 menunjukkan tren dari koefisien daya yang dihasilkan, dimana instalasi *single stage* memiliki koefisien daya yang lebih tinggi daripada *dual stage*. Nilai maksimum yang mampu dicapai oleh instalasi turbin dengan rotor Darrieus *single stage* adalah 0.0416 dan 0.0371 untuk instalasi turbin dengan rotor Darrieus *dual stage*.



Gambar 4.21 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang chord sudu Darrieus 2 cm terhadap TSR,  $Re = 6.28 \times 10^6$ ,  $1.28 \times 10^7$ ,  $1.91 \times 10^7$

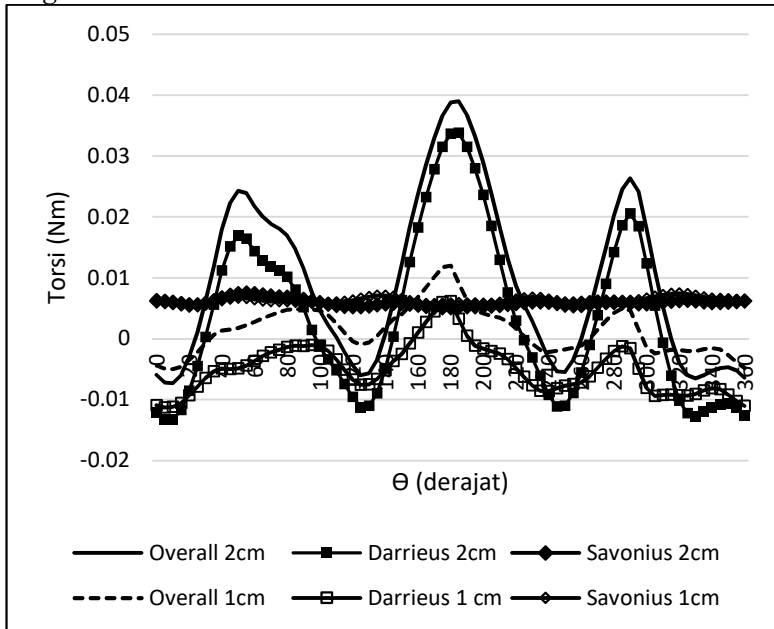


Gambar 4.22 Grafik koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang chord sudu Darrieus 2 cm terhadap TSR,  $Re = 6.28 \times 10^6$ ,  $1.28 \times 10^7$ ,  $1.91 \times 10^7$

#### 4.7. Analisis Perbandingan Panjang *chord* sudu Darrieus

Pada gambar 4.23 dapat dilihat bagaimana tren grafik dari turbin secara keseluruhan (*overall*) untuk instalasi dengan panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm lebih tinggi bila dibandingkan dengan instalasi dengan panjang *chord* 1 cm. Hal ini dikarenakan luas penampang pada sudu Darrieus yang lebih kecil. Namun, bila dilihat trennya, Torsi Darrieus pada instalasi dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm cenderung malah membebani kinerja turbin. Dan diangkat performanya dengan signifikan oleh rotor Savonius. Berbeda dibandingkan dengan instalasi dengan panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm, dimana pada instalasi ini, rotor Savonius, hanya meningkatkan sedikit saja torsi yang dihasilkan oleh rotor Darrieus. Rotor Savonius pada instalasi ini, berfungsi lebih banyak, pada sudut  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  dan  $240^\circ$  dimana pada posisi ini torsi negatif dihasilkan pada rotor Darrieus. Dilain pihak, Rotor Savonius pada variasi 2 cm memiliki nilai torsi hasil yang sedikit lebih kecil yaitu 0.05926 Nm rata – ratanya pada kecepatan 10 m/s

sementara dengan panjang chord 1 cm, torsi yang mampu dihasilkan rata –rataya 0.6331 Nm. Hal ini dikarenakan, pertambahan panjang sudu Darrieus mengurangi luasan efektif rotor Savonius yang dapat digunakna untuk mengekstraksi gaya *drag*.

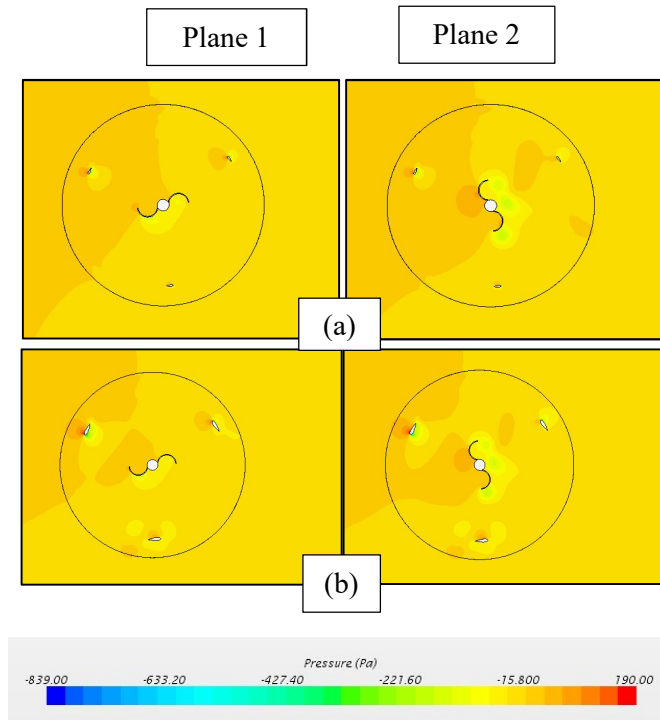


Gambar 4.23 Grafik tren torsi yang dihasilkan turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* pada kecepatan 10m/s

Kontur Tekanan yang ditunjukkan pada gambar 4.24 menunjukkan bagaimana instalasi turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm memiliki daerah kontur tekanan yang luas didaerah sekitar sudu Darrieus 3. Hal ini lah yang menunjukkan bagaimana rotor Darrieus pada instalasi deengan panjang *chord* 2 cm mampu menciptakan gaya lift yang lebih besar dan berbanding lurus dengan torsi yang



dihasilkan. Posisi sudut  $\Theta = 180^\circ$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.24 merupakan posisi sudut ekstraksi maksimal dari masing – masing variasi pada turbin.

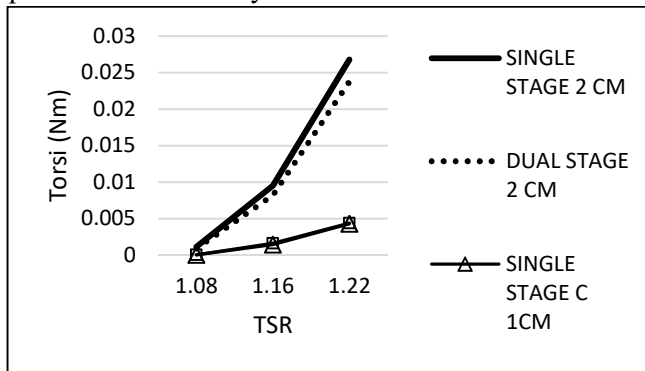


Gambar 4. 24 Kontur Tekanan untuk masing – masing instalasi turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* (a) dengan panjang *chord* 1cm,  $Re = 6.38 \times 10^6$  (b) dengan panjang *chord* 2 cm,  $Re = 1.28 \times 10^7$  pada kecepatan 10 m/s,  $\Theta = 180^\circ$

Pernyataan Gosselin et. al. (2014) mengenai sulitnya penangkapan fenomena pada rotor Darrieus Darrieus dengan *Solidity* rendah pada TSR rendah, terbukti dengan grafik torsi yang lebih halus tercipta pada turbin dengan panjang *chord* Darrieus 2

cm ( $\sigma = 0.52$ ) dibandingkan dengan panjang chord Darrieus 1 cm ( $\sigma = 0.26$ ).

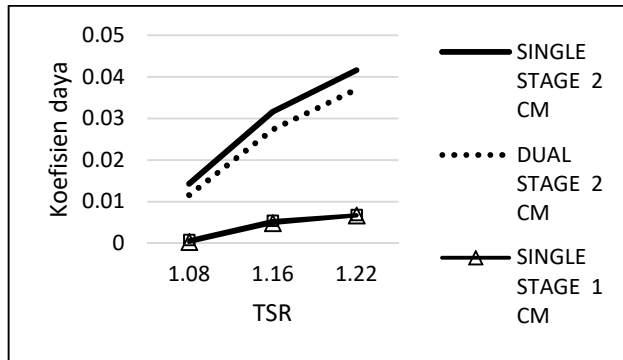
Tren dari grafik torsi rata – rata yang dihasilkan turbin dengan panjang sudu *chord* Darrieus 2 cm memiliki nilai yang signifikan perbedaan dengan instalasi dengan panjang *chord* Darrieus 1 cm. Artinya, Rotor Darrieus dengan panjang *chord* Darrieus 1 cm sangat tidak direkomendasikan untuk dipakai pada operasi turbin dengan rentang TSR 1.08 – 1.22. Akan tetapi masih ada kemungkinan turbin jenis ini mampu baik dioperasikan pada TSR yang lebih tinggi. Hal ini juga diperkuat dengan tren grafik koefisien daya yang ditunjukkan pada gambar 4.26 Dimana nilai maksimum koefisien daya yang dapat dicapai oleh turbin dengan panjang *chord* sudu Darrieus 1 cm adalah 0.0065 pada instalasi dengan rotor Darrieus *dual stage* sementara koefisien daya maksimum yang mampu dicapai oleh turbin dengan panjang *chord* 2 cm pada sudu Darrieusnya adalah 0.0416.



Gambar 4.25 Grafik Tren torsi rata –rata dari turbin angin Darrieus – Savonius terhadap TSR

Pada kedua jenis variasi panjang *chord* sudu Darrieus ini, tren masih menunjukkan peningkatan koefisien daya. Artinya, koefisien daya yang mampu dihasilkan keempat instalasi ini masih

dapat meningkat seiring dengan peningkatan TSR. Peningkatan koefisien daya ini nantinya akan memuncak di TSR tertentu dan kemudian turbin tidak dapat menghasilkan daya lagi secara efektif.



Gambar 4. 26 Grafik tren Koefisien daya dari turbin Darrieus – Savonius terhadap TSR

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Pada studi numerik turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* dan *dual stage* ini. Dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Interaksi angin terhadap sudu – sudu pada rotor Savonius menciptakan gaya *drag* yang memberikan torsi terhadap turbin dan juga membuat daerah wake di bagian *downstream* turbin yang menyebabkan ekstraksi energi oleh sudu Darrieus pada bagian *downstream* turbin tidak maksimal. Sementara itu, interaksi aliran terhadap sudu Darrieus menciptakan gaya *lift* pada suatu sudu Darrieus dan karena bentuknya yang tipis tidak mempengaruhi sudu atau rotor Darrieus lainnya.
2. Torsi yang dihasilkan turbin angin Darrieus - Savonius yang dilengkapi dengan rotor Darrieus *single stage* mampu menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan rotor Darrieus *dual stage*. Hal ini ditunjukkan dengan nilai maksimum daya yang dihasilkan pada turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor *dual stage* adalah 0.0416 pada TSR 1.22 dengan panjang *chord* sudu Darrieus 2 cm. Sementara, hasil yang diperoleh pada turbin angin Darrieus – Savonius dengan panjang *chord* 1 cm memiliki nilai yang hampir sama.
3. Performa dari rotor Darrieus *dual stage* mampu menghasilkan rentang torsi minimum – maksimum yang lebih sempit. Namun rata – rata yang dihasilkan dalam satu putaran masih lebih rendah daripada yang dihasilkan oleh rotor Darrieus *single stage*.
4. Panjang *chord* sudu rotor Darrieus 1 cm tidak direkomendasikan untuk instalasi turbin angin Darrieus – Savonius yang beroperasi pada TSR rendah. Namun ada

kemungkinan instalasi tersebut dapat beroperasi pada TSR yang lebih tinggi.

## 5.2. Rekomendasi

Adapun beberapa rekomendasi yang dapat diberikan untuk penelian selanjutnya yaitu :

1. Diperlukan studi lebih lanjut dengan kecepatan angin dan kecepatan turbin angin yang lebih tinggi sehingga dapat diketahui titik optimum dari performa turbin angin Darrieus – Savonius ini.
2. Diperlukan studi lebih lanjut terhadap penggunaan perangkat lunak yang berbeda serta studi lebih lanjut terhadap perhitungan *frontal area* turbin yang dipakai dalam perhitungan koefisien daya.

## DAFTAR PUSTAKA

Akwa, J. V., Vielmo H. A., Petry A. P., *A Review on The Performance of Savonius Wind Turbines*. Elsevier Ltd. 2012

Bashar, Mohammad M., *Computational and Experimental Study on Vertical Axis Wind Turbine in Search for an Efficeint Design*. Electronic Thesis & Dissertations. Paper 1184 2014.

Bhutta, M.M.A., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali, Z., Jamil, Sh. R., Hussain, Z. *Vertical Axis Wind Turbine - A Review of Various Configurations and Design Techniques*. Elsevier Ltd. 2011

Biswas, A., Bhuyan, S., *Investigations on Self-starting and Performance Characteristics of simple H and Hybrid H – Savonius Vertical Axis Wind Rotors*. Elsevier Ltd. ; 2014

Dwiyantoro, B. A., Suphandani V., Rahman, **Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus – Savonius**. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTMXIV) : 2015

Gosselin, R., Dumas, G., Boudreau, M., *Parametric Study of H-Darrieus Vertical-axis Turbines Using CFD Simulations*. AIP publishing ; 2016

Ionescu, R. D., Vlase, S., Ivanoiu M., *Rotor Design for Vertical Axis Wind Turbines, Suitable for Urban Seashore Environment or Naval Industry Implementation ( Numerical Methods and Analythical Calculus )*. International Conference ISTM 2014 papers.; 2014

Kanyako, F., Janajreh, I., *Vertical Axis Wind Turbine Performance Prediciton, High and Low Fidelity Analysis*.

Proceedings of the 2014 IAJC-ISAM International Conference.  
2014

Kumar, A., Nikhade, A., ***Hybrid Kinetic Turbine Rotors: A Review.*** International Journal of Engineering Science & Advanced Technology ; 2014



## BIODATA PENULIS



**Dananta Putra Teja** lahir di Denpasar, 24 Oktober 1994, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Putu Tedja dan Cahyanita. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD YPPI 1 Surabaya pada tahun 2006. Lalu pendidikan menengah di SMP YPPI 2 Surabaya pada tahun 2009. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMA YPPI 1 Surabaya pada tahun 2009 sampai 2012. Ketertarikan penulis pada dunia keteknikan mendorong penulis untuk melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Fakultas Teknologi Industri (FTI), jurusan teknik mesin. Khususnya, dalam bidang studi mekanika fluida

Selama masa perkuliahan penulis banyak mendapat kesempatan dalam mengembangkan dan menggali potensi, baik dibidang akademik maupun non-akademik. Ketertarikan penulis dalam bidang aerodinamika fluida membuat penulis aktif mengikuti kegiatan laboratorium Mekanika dan Mesin fluida yaitu sebagai asisten praktikum serta menjabat sebagai koordinator praktikkum pada tahun 2016 . Penulis juga aktif di Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) dengan menjabat sebagai Staf Departemen Sosial dan Masyarakat 2013-2014 dan di Tim Pembina Kerohanian Buddha (TPKB) ITS sebagai sekretaris. Untuk informasi dan saran serta kepentingan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui email [danantateja@gmail.com](mailto:danantateja@gmail.com)